

**VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> EN LAS  
PRINCIPALES VÍAS DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA**

**JUAN ROBERTO DE JESUS RUA DIAZ**

**ZAHORY MILETH LOPEZ MARTINEZ**



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC**

**DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL**

**INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BARRANQUILLA, COLOMBIA**

**2021**

**VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> EN LAS  
PRINCIPALES VÍAS DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA**

**JUAN ROBERTO DE JESUS RUA DIAZ**

**ZAHORY MILETH LOPEZ MARTINEZ**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: INGENIERO AMBIENTAL**

**TUTOR: ERIKA BLANCO DONADO**

**COTUTOR: ISMAEL LUIS SCHNEIDER**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BARRANQUILLA, COLOMBIA**

**OCTUBRE, 2021.**

**Nota de aceptación.**

---

---

**Presidente del Jurado.**

---

**Jurado.**

---

**Jurado.**

**Barranquilla, octubre de 2021.**



### **Dedicatoria**

*A Dios, por ser mi luz y mi fortaleza.*

*A mis padres, Juan Rua Pacheco y Edilia Diaz Márquez, por haber forjado la persona que soy, por las enseñanzas, el amor, la paciencia, el trabajo en equipo y el sacrificio. Me siento enormemente orgulloso y privilegiado de ser su hijo, los amo mucho.*

*A mis hermanas Ginna Rua y Marly Rua por acompañarme en este proceso, por confiar en mí y motivarme día a día.*

*A mi amiga Zahory López por ser mi dúo en este trabajo y afrontar este reto conmigo, por la paciencia y la perseverancia para hacer de esto posible con su conocimiento, amabilidad y entera disposición.*

*A Mileidy Camacho, Oscar Gutiérrez y Antonio Ayo por su amor, amistad y apoyo en todos los momentos de dificultad, por los buenos consejos y sus palabras de aliento.*

*A todos mis familiares y amigos, que me han brindado su apoyo para que este proyecto se realizara con éxito.*

***Juan Roberto De Jesus Rua Diaz***

### **Dedicatoria**

*A Dios por acompañarme en todo el camino para llegar a la meta*

*A mis Padres Daysi Martínez y Huberto López, por todo el apoyo y amor incondicional brindado, mil gracias por todo los sacrificios realizados, sin ustedes no podría haber cumplido esta meta, son el mejor regalo que la vida me pudo dar, porque padres como ustedes no todo el mundo los tiene.*

*A mi Madre adoptiva Daisy Lapeira por todo el amor, la paciencia, la dedicación y las enseñanzas de vida que gracias a ti soy lo que soy.*

*A mis Abuelos Cristina Charris y Alonso Martínez por brindarme tanto amor como ningún otro.*

*A mis hermanos Gary López, Mathyas Martínez y Leonardo López por estar siempre apoyándome en cada momento de mi vida, son mi motivación para salir adelante y nunca rendirme.*

*A mi amigo, Juan Rúa por ser ese compañero incondicional en esta travesía, gracias por todo el esfuerzo, la dedicación, la fortaleza, la perseverancia y el positivismo, fue todo un placer lograr nuestra meta juntos.*

*A todos mis familiares y amigos que me han brindado su apoyo para culminar exitosamente este proyecto.*

**Zahory Mileth López Martínez**

### **Agradecimientos**

*A Dios, que nos acompaña todos los días, por darnos la fortaleza y sabiduría en este camino, gracias por guiar nuestros pasos y no abandonarnos nunca, por darnos la satisfacción de lograr este reto.*

*Agradecemos a nuestros tutores Ismael Schneider y Erika Blanco coordinadores del semillero de investigación Grupo de Evaluación y Control de la Contaminación Atmosférica – GECCA*

*Gracias, profesores por el tiempo dedicado, por confiar en nosotros, por sus esfuerzos, por su compromiso y paciencia, que fueron la base fundamental para el desarrollo de este proyecto.*

*Agradecemos al Ingeniero Diego Hernández por asistirnos, ayudarnos y ofrecernos su tiempo y valioso conocimiento.*

*En este proceso, tuvimos el apoyo y la motivación de nuestros colegas las ingenieras Alexa Martes, Imera Pertuz y Leidy Vizcaino que nos brindaron su más sincera ayuda.*

*A las grandiosas personas que ayudaron a lo largo de este proyecto, amigos, estudiantes y toda la comunidad Unicosta que hicieron parte de esta importante etapa de nuestras vidas.*

*Este proyecto fue realizado gracias a la financiación de MINCIENCIAS en el marco del proyecto: 141180764164, CT CT-815-2018*

### Resumen

El material particulado atmosférico (PM) urbano es un contaminante de gran importancia por las afectaciones que genera a la salud de las personas y al medioambiente. La presencia del PM en zonas urbanas varía espacialmente, por lo que pueden encontrarse altas o bajas concentraciones en diferentes zonas de una misma ciudad.

En este estudio, se utilizó un contador de partículas HAL-HPC601 y un GPS Garmin Oregon 350 a una altura de 1,60 m en la ejecución de monitoreos móviles para comprender la dinámica del material particulado e identificar puntos calientes en las principales vías de la ciudad de Barranquilla, fueron realizados 9 monitoreos móviles en los meses de julio y agosto de 2019, realizados en días hábiles entre las 14:00 y 17:00 horas con una distancia total recorrida de 35,9 km obteniendo mapas de alta resolución de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  a lo largo de la ruta de monitoreo (Vía 40, Calle 30 y Avenida Circunvalar) para representar la variabilidad espacial de las concentraciones de PM. En el análisis de los datos de concentración, se identificaron los datos atípicos a través del análisis de la desviación estándar. Los resultados evidencian que los puntos con mayor concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  fueron registrados en la Calle 30, zona con alta congestión vehicular, con resultados promedios de concentración de  $68,49 \pm 54,28 \mu g/m^3$  para el  $PM_{10}$  y de  $16,66 \pm 4,19 \mu g/m^3$  para el  $PM_{2.5}$ . Este tramo de la vía posee el mayor número de semáforos y cámaras de foto detección. El material particulado tiende a concentrarse en los tramos de carreteras con mucho tráfico en las proximidades a fuentes probables, como intersecciones, cruce de peatones, vías con baja velocidad y sectores de congestión vehicular. Las zonas comerciales e industriales se relacionan con altas concentraciones de material particulado, es probable que sean el resultado del aporte en conjunto

de fuentes fijas y móviles. Sin embargo, dado que todo el muestreo se realizó en vías públicas, y muy cercano a la fuente, algunas mediciones altas se atribuyen a la congestión vehicular y los vehículos pesados.

**Palabras clave:** Contaminación atmosférica, Monitoreo móvil, Variabilidad espacial, Tráfico Vehicular, PM.

### Abstract

Urban atmospheric particulate material (PM) is a highly important pollutant due to the effects it generates on people's health and the environment. The presence of PM in urban areas varies spatially, so high or low concentrations can be found in different areas of the same city.

In this study, a HAL-HPC601 particle counter and a Garmin Oregon 350 GPS were used at a height of 1.60 m in the execution of mobile monitoring to understand the dynamics of the particulate matter and identify hot spots on the main roads of the city of Barranquilla, 9 mobile monitoring were carried out in the months of July and August 2019, carried out on business days between 2:00 p.m. and 5:00 p.m. with a total distance traveled of 35.9 km, obtaining high-resolution maps of the PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations along the monitoring route (Vía 40, Calle 30 and Avenida Circunvalar) to represent the spatial variability of PM concentrations. In concentration data analysis, outliers were identified through standard deviation analysis. The results show that the points with the highest concentration of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were recorded in Calle 30, an area with high traffic congestion, with average concentration results of  $68.49 \pm 54.28 \mu\text{g} / \text{m}^3$  for PM<sub>10</sub> and  $16, 66 \pm 4.19 \mu\text{g} / \text{m}^3$  for PM<sub>2.5</sub>. This section of the road has the largest number of traffic lights and photo detection cameras. Particulate matter tends to concentrate on stretches of high-traffic roads in close proximity to likely sources, such as intersections, pedestrian crossings, slow-speed roads, and areas of vehicular congestion. Commercial and industrial areas are associated with high concentrations of particulate matter, it is likely that they are the result of the report in the set of fixed and mobile sources. However, since all the sampling was carried out on public roads, and very close to the source, some high measurements are attributed to traffic congestion and heavy vehicles.

***Keywords:*** Air Pollution, Mobile Monitoring, Spatial Variability, Vehicle Traffic, PM.

## Contenido

1.	Introducción	19
2.	Objetivos .....	22
2.1.	Objetivo general .....	22
2.2.	Objetivos específicos .....	22
3.	Planteamiento del Problema .....	23
4.	Justificación .....	26
5.	Marco Teórico.....	30
5.1.	Contaminación del Aire.....	30
5.2.	Material Particulado.....	31
5.3.	Efectos a la Salud del PM .....	33
5.4.	Efectos del PM al ambiente .....	35
5.5.	Monitoreo Móvil.....	37
6.	Estado del arte.....	39



7. Metodología.....	43
7.1. Tipo de estudio .....	43
7.2. Área de estudio .....	43
7.3. Recolección de datos .....	48
7.4. Registro y procesamiento de los datos .....	53
8. Resultados y discusión .....	63
9. Conclusión.....	89
10. Recomendaciones .....	91
11. Referencias.....	94
12. Anexos.....	112

## Lista de Figuras

### Figuras

Figura 1. Contaminantes y fuentes de contaminación del aire .....	30
Figura 2. Comparación de diámetro de las partículas de PM .....	31
Figura 3. Capacidad de afectación de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en las regiones del sistema respiratorio.....	34
Figura 4. Usos del suelo de la ciudad de Barranquilla.....	46
Figura 5. Clasificación del suelo de la ciudad de Barranquilla.....	47
Figura 6. Área y ruta de estudio. Las vías principales de la ciudad son Vía 40 (1), Calle 30 (2) y Avenida Circunvalar (3). .....	49
Figura 7. Plataforma móvil para la medición de material particulado (PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> ). .....	51
Figura 8. Diagrama de flujo del registro y procesamiento de los datos.....	55
Figura 9. Límites de valores atípicos de $\pm 3$ desviaciones estándar respecto de la media.....	56
Figura 10. Resultado de la herramienta XtoolBox.....	58

Figura 11. Herramienta UNION realizada en ArcGis .....	59
Figura 12. Herramienta CLIP realizada en ArcGis.....	60
Figura 13. Herramienta Multipart to Singlepart .....	61
Figura 14. Shapefile de segmentación .....	61
Figura 15. Concentraciones promedio de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	63
Figura 16. Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM <sub>10</sub> para todas las campañas de monitoreo móvil. ....	66
Figura 17. promedio de PM <sub>10</sub> tramo calle 30.....	68
Figura 18. Promedio PM <sub>10</sub> tramo vía 40.....	69
Figura 19. Promedio de PM <sub>10</sub> tramo Avenida Circunvalar.....	72
Figura 20. Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM <sub>2.5</sub> para todas las campañas de monitoreo móvil. ....	73
Figura 21. Promedio de PM <sub>2.5</sub> tramo calle 30.. ....	75

Figura 22. Promedio de PM2.5 tramo de la Vía 40. ....	77
Figura 23. Promedio de PM2.5 tramo Avenida Circunvalar. ....	79
Figura 24. Porcentaje de los tipos de vehículos del parque automotor en el 2019 .....	83
Figura 25. Porcentaje de vehículos por tipos de combustible.....	84

**Lista de Tablas****Tablas**

Tabla 1. Estadística descriptiva de los monitoreos móviles de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> (concentraciones presentadas en µg/m <sup>3</sup> ).....	64
Tabla 2. Comparación de los resultados del presente estudio con estudios anteriores .....	87

**SIGLAS Y ABREVIATURAS**

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**PM:** Material particulado

**PM<sub>10</sub>:** Material particulado menor o igual a 10 micras

**PM<sub>2.5</sub>:** Material particulado menor o igual a 2.5 micras

**CO:** Monóxido de carbono

**NO<sub>x</sub>:** Óxidos de nitrógeno

**O<sub>3</sub>:** Ozono

**SO<sub>2</sub>:** Dióxido de azufre

**COV:** Compuestos orgánicos volátiles

**HAP:** hidrocarburos aromáticos policíclicos

**DANE:** Departamento Administrativo Nacional de Estadística

**EPOC:** Enfermedad pulmonar obstructiva crónica

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

**HAP:** hidrocarburos aromáticos policíclicos

**ARCGIS:** conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica

**WGS:** World Geodetic System 1984

**POT:** Plan de Ordenamiento Territorial

## 1. Introducción

Actualmente la problemática ambiental que está generando gran preocupación a nivel global es la contaminación del aire, debido al aumento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos que están causando fuertes impactos negativos al medio ambiente, a la salud pública y en general a la calidad de vida de la población mundial (Carrasco, 2018; Romero, 2006).

Uno de los contaminantes que están generando mayor afectación en la mayoría de las ciudades es el material particulado;  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , que hacen parte de los denominados contaminantes atmosféricos criterio (Querol, 2018). El  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  son una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire, que, dependiendo de su composición, reaccionan químicamente en la atmósfera (CEUPE, 2020; Angulo, Huertas, & Restrepo, 2011). Sus principales fuentes de emisión son: el transporte, las obras civiles, las industrias, la agricultura, las quemas a cielo abierto, entre otras. Las cuáles emiten una mezcla de productos químicos y/o elementos biológicos, como metales, sales, materiales carbonosos, compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y endotoxinas que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos (Arciniegas, 2011).

Las principales fuentes de emisión urbana son las fuentes móviles (Echeverri & Maya, 2008). Los vehículos de gasolina y diésel emiten PM por lo que las concentraciones del contaminante generalmente son más altas cerca de carreteras con altos niveles de tráfico vehicular (Hitchins, 2020). Como consecuencia, se ha presentado un aumento significativo de las emisiones urbanas (Querol, 2018).

Debido a distintas variables como la ubicación de las fuentes de emisión, la topología del terreno, el uso del suelo y las configuraciones de las vías es posible la variabilidad espacial de las concentraciones del material particulado (PM) en las áreas urbanas, evidenciando zonas con elevadas concentraciones de PM en sitios cercanos a semáforos, intersecciones de tráfico vehicular o áreas señalizadas para el cruce de peatones, causados por patrones de conducción de vehículo (*stop and go*) y congestión vehicular (Créso et al., 2021).

Por sus efectos a la salud y los impactos sobre los ecosistemas, el clima, el ciclo hidrológico y la agricultura (Salguero, 2016; Salinas, 2011), este contaminante es considerado trazador de contaminación atmosférica. Por lo tanto, su monitoreo es primordial. No obstante, su estudio es complejo porque requiere de un análisis y seguimiento constante para el establecimiento de estrategias que permitan la disminución de las concentraciones de material particulado. Una de las herramientas usada ampliamente para el seguimiento y la evaluación de la contaminación del aire es el monitoreo móvil, una metodología eficiente que brinda información sobre la distribución espacial del contaminante con una alta resolución de tiempo, cuantifica las concentraciones en el área de estudio e identifica puntos críticos (Samad & Vogt, 2020; Wen, et al., 2019).

Por lo tanto, para una ciudad como Barranquilla donde el desarrollo económico y portuario está en crecimiento, se evidencia un aumento de industrias, proyectos de obra civil y del tráfico vehicular, es fundamental el conocimiento del estado de su calidad del aire. En ese sentido, con el incremento de las fuentes de emisión en la ciudad, se evidencia aumento de las concentraciones de material particulado (Bonilla, 2010), es muy importante comprender la dinámica atmosférica del PM. Por lo que se evalúa la variabilidad espacial de las



concentraciones de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) emitido por las fuentes móviles en las principales vías de la ciudad de Barranquilla.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar la variabilidad espacial de las concentraciones de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) en las principales vías de Barranquilla (Vía 40, Calle 30 y Avenida Circunvalar).

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar las concentraciones de material particulado a partir monitoreos móviles en la ciudad de Barranquilla.
- Identificar los puntos con mayor concentración de PM a lo largo de la ruta estudiada.
- Analizar la distribución espacial de las concentraciones de material particulado en función a las distintas variables de tráfico y uso de suelo.

### 3. Planteamiento del Problema

La contaminación del aire es un problema ambiental que afecta a todo el planeta y se presenta con frecuencia en las zonas urbanas, causada en su mayor parte, por la acelerada industrialización y urbanización. Esos procesos, junto con el aumento del parque automotor, influyen en el alza del consumo de combustibles fósiles y emisión de contaminantes que pueden acumularse en la atmósfera. (MinAmbiente, 2016; Blanco, 2006; Romero, 2006)

La contaminación producto de fuentes móviles origina material particulado en el aire urbano, siendo el tráfico por carretera una de estas principales fuentes debido a las emisiones por la combustión de los vehículos a motor, el cizallamiento mecánico de las partes, la fricción entre los neumáticos y las superficies de las carreteras producen especialmente partículas de  $PM_{10}$  y de  $PM_{2.5}$ . Durante estos procesos se producen emisiones de partículas debido a las fuerzas de corte y fricción que surgen del contacto entre la rueda del vehículo y la superficie de la carretera debido a la pérdida de masa de la superficie de la carretera a causa de la fricción de los neumáticos (Okokon, et al., 2018; Kole, Löhr, Van Belleghem, & Ragas, 2017; DeMarini, 2013; Kinney, et al., 2011; Snilsberg, Myran, & Uthus, 2008) contribuyendo aproximadamente al 25% de las partículas  $PM_{2.5}$  emitidas a la atmósfera (Karagulian, et al., 2015).

Las emisiones producidas por los vehículos de gasolina y diésel son la principal causa del alto nivel de PM en las zonas urbanas (Hitchins, 2020). Este contaminante ha sido el foco de varios estudios epidemiológicos y toxicológicos debido a sus efectos nocivos para la salud, que incluyen morbilidad y mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Brokamp, Brandt, & Ryan, 2019; Wang, Xiong, & Tang, 2017; Ostro, et al., 2015; Thundiyil, Anderson, &

Stolbach, 2012; Anenberg, Horowitz, Tong, & West, 2010). El PM está asociado a compuestos con actividad genotóxica, mutagénica o carcinogénica (Arciniegas, 2011).

La contaminación del aire representa uno de los principales factores de riesgo de muerte y enfermedad a nivel mundial (Cohen, et al., 2017). Esta problemática ha sido reportada como la segunda causa de muerte por enfermedades no transmisibles, asociándose a enfermedades como la cardiopatía isquémica, accidente cerebrovascular, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y cáncer de pulmón (OMS, 2018). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó en el 2016, que la contaminación del aire a nivel mundial provoca la muerte de aproximadamente 4,2 millones de personas cada año y otra parte sufre enfermedades respiratorias, cardiopulmonar, alergias, entre otras enfermedades (OMS, 2018).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Salud (INS), el 8% de la tasa de mortalidad anual de Colombia está asociado a factores ambientales (INS, 2018) y conforme con los análisis realizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la contaminación del aire en Colombia es el tercer factor generador de costos sociales después de la contaminación del agua y de los desastres naturales (Minambiente, 2021).

La emisión de contaminantes de origen vehicular constituye una de las causas más relevantes en el deterioro de la calidad del aire, lo que afecta la composición química de la atmósfera a nivel local y regional (Arciniegas, 2011), también representa un riesgo para la estabilidad de la biosfera en general; ecosistemas y recursos naturales. Esos efectos están asociados principalmente a las elevadas concentraciones de material particulado atmosférico, siendo el medio natural el principal afectado por los efectos de la contaminación del aire (ONU, 2019; ACNUSA, 2018; Gobierno de la Rioja, 2016).

Esta contaminación puede recorrer distancias importantes e instalarse en el suelo o el agua. Según la composición química, los efectos de la sedimentación pueden provocar que lagos y arroyos se vuelvan ácidos, cambios en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales, reducir nutrientes en el suelo, daño en bosques sensibles y cultivos agrícolas, efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas y la contribución a los efectos de la lluvia ácida (EPA, 2017). El material particulado tiene la capacidad absorber la radiación solar, aumentando la temperatura atmosférica, alterando así múltiples fenómenos naturales (Blanco, Evaluacion de la variabilidad espacial de black carbon, 2019; Bond, et al., 2013).

La presencia del PM en zonas urbanas varia espacialmente, por lo que pueden encontrarse altas o bajas concentraciones de este contaminante en diferentes zonas de la ciudad, asociadas a los usos del suelo, flujo vial y estados de las vías (Créso, et al., 2021).

En esta investigación se plantea el uso de monitoreo móvil para medir las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la Vía 40, Calle 30 y Avenida Circunvalar de la ciudad de Barranquilla, el cual permitirá la determinación de los puntos con mayores concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , analizando la distribución espacial de la concentraciones mediante el programa de información geográfica (ArcGIS) con el fin de conocer; ¿Cuáles son los puntos donde se presenta mayores concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  producto de las fuentes móviles a lo largo de las principales vías de la ciudad de Barranquilla?

#### 4. Justificación

En Colombia, el PM es emitido principalmente por la quema de combustibles fósiles, por el transporte automotor y el sector industrial. Se estima que aproximadamente el 80% de las partículas de PM son generadas por las fuentes móviles, mientras que el 20% restante lo aportan las fuentes fijas, todo esto en consecuencia del creciente número de la población, el aumento de la urbanización y el crecimiento económico de las ciudades (MADS, 2019).

La exposición de las personas a la contaminación del aire se ha asociado con un mayor riesgo a problemáticas de salud. La ciudad de Barranquilla aumentó su población de 1,20 millones de habitantes en el año 2018 respecto al año 2010 cuando tenía 1,18 millones de habitantes. Este rápido crecimiento urbano ha resultado en un número creciente de personas que están expuestas a altas concentraciones de PM puesto que, viven, transitan y trabajan cerca de fuentes de contaminación del aire, como autopistas, carreteras principales, centros de distribución de carga e industrias (DANE, 2020; OMS, 2018; Romero, 2006).

En las áreas urbanas, las vías presentan una colección compleja de fuentes de contaminación del aire que pueden ser difíciles de caracterizar (Ubilla & Yohannessen, 2017). Las ubicaciones geográficas relacionadas con la cercanía a las carreteras principales, junto con los mecanismos de acumulación y dispersión dan como resultado un patrón de distribución complejo de PM en los microambientes urbanos (Liu et al., 2019).

La ciudad de Barranquilla se ubica quinta a nivel nacional en lo que corresponde a la tenencia de vehículos (Tellez, 2018), y posee un parque automotor total de 202.827 para el año 2021 registrados en el tránsito de la ciudad de Barranquilla (Alcaldía de Barranquilla, 2020; Tellez, 2018). Las fuentes móviles son las principales generadoras de material particulado, y este a su vez es causante de impactos negativos al medio ambiente y a la salud de las personas

debido a que puede generar afectaciones en función de su composición química y tamaño de partícula. A menor tamaño de partícula, el PM puede penetrar profundamente en el tracto respiratorio, llegando a los bronquios y los alvéolos causando enfermedades respiratorias (Cakmak, et al., 2018; Baklanov, Molina, & Gauss, 2016; Krewski, et al., 2009; Laden, Schwartz, Speizer, & Dockery, 2006; Pope, et al., 2002) por esto, la importancia de producir información que permita conocer los niveles de concentración del contaminante.

Es probable que los trabajadores urbanos al aire libre, como la policía de tránsito, los guardias de estacionamiento, los barrenderos o los vendedores ambulantes, se expongan a elevadas concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (Violante, et al., 2006). Por esto los datos institucionales proporcionados por las estaciones fijas de monitoreo del aire no pueden tomarse automáticamente como indicadores de los niveles reales de exposición a nivel del suelo a lo que están expuestos los trabajadores de la calle, que pueden ser significativamente más altos

Esta investigación permitirá medir las concentraciones de PM a nivel del suelo en las principales vías de la ciudad de Barranquilla identificando los puntos con mayor concentración del contaminante asociado a la emisión por fuentes móviles, la intensidad de tráfico, el uso del suelo, estados de las vías y elementos variables de tránsito. Para esto, se utilizará la metodología de monitoreo móvil, que permitirá evaluar la distribución espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos sin la necesidad de una red densa de monitoreo estacionario. (Wen, et al., 2019; Bukowiecki, et al., 2002).

El monitoreo móvil es una metodología que brinda flexibilidad para medir y evaluar las concentraciones del material particulado en toda la ruta escogida (Wallace, Corr, & Kanaroglou, 2010; Pirjola, et al., 2004) a diferencia de las estaciones fijas que son útiles para realizar registros continuos a largo plazo, estas no permiten evaluar la variabilidad espacial de los contaminantes a

través de la ruta ya que se instalan de manera permanente en un sólo lugar (Wallace, Corr, & Kanaroglou, 2010). Los valores registrados representan concentraciones instantáneas medidas cerca de las fuentes de contaminación; de esta manera, tienden a presentar una mayor variabilidad en función del tiempo de medición (Wang, et al., 2009). A diferencia del monitoreo fijo que se basa en sitios de monitoreo y puede demostrar una tendencia general con una baja resolución espaciotemporal. Estas estaciones miden las concentraciones de los contaminantes de múltiples fuentes por lo que no serían las ideales para medir las concentraciones producto de las fuentes móviles (Samad & Vogt, 2020).

La versatilidad de la vigilancia móvil ha sido utilizada en múltiples investigaciones realizadas en Suiza (Bukowiecki et al., 2002), China (Pirjola et al., 2004), Finlandia (Pirjola et al., 2012) Canadá (Wallace, Corr, & Kanaroglou, 2010; DeLuca, Corr, Wallace, & Kanaroglou, 2012) y EE. UU. (Padró et al., 2012; Maciejczyk et al., 2004) . Esta metodología permite tomar medidas que se basan en las concentraciones observadas sin depender de una fuente independiente, mejorando la capacidad de medición de las concentraciones del contaminante. Además, ofrece mediciones de patrones de contaminación distribuidas en toda el área e integra dispositivos para la medición de otras variables simultáneamente, de manera que la movilidad permite a los investigadores tomar medidas que representan una gran cantidad de vehículos, abarcando mayor área al momento de muestrear (Wen et al., 2019).

La unidad de monitoreo móvil es adaptada a las necesidades del monitoreo y a los equipos que deba llevar para la medición de los contaminantes, usando plataformas para el montaje de equipos dependiendo de la metodología establecida (Wen et al., 2019). El monitoreo móvil permite analizar las concentraciones en función a distintas variables, por lo que es usado para identificar puntos de concentración de PM con una variable de tiempo y lugar, proporciona



información para el conocimiento de la dinámica del material particulado en áreas urbanas complejas y posteriormente establecer medidas de mitigación en la emisión y exposición al contaminante (Lei et al., 2017).

Esta metodología permite representar las concentraciones de forma gráfica; un mapa que ayuda a identificar los patrones de emisión a lo largo de la ruta y zonifica el área en función a los niveles de concentración obtenidos (Wen et al., 2019). Por lo tanto, la presente investigación se enfoca en estudiar la variabilidad espacial de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , en las vías más importantes de la ciudad de Barranquilla conformadas por: la Vía 40, Calle 30 y Avenida Circunvalar. Estas vías fueron estratégicamente escogidas por la dependencia e importancia que tienen a nivel de movilidad en la ciudad, estas carreteras rodean el casco urbano y atraviesan la ciudad de Barranquilla siendo indispensables para llegar a cualquier destino y transitadas por todo tipo de vehículos.

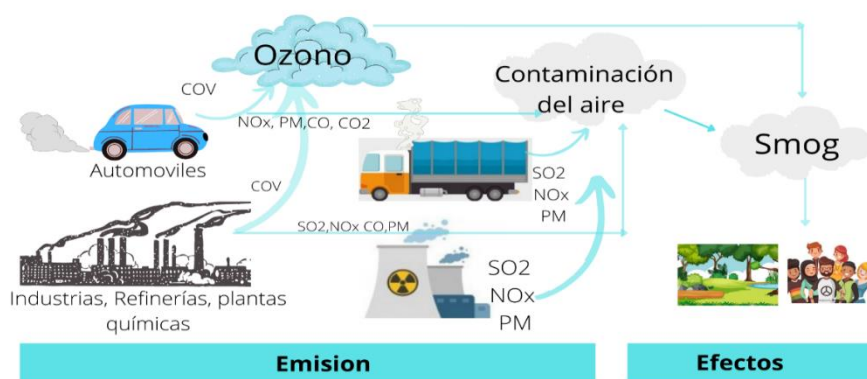
Esta investigación proporciona uno de los primeros estudios que utilizan el monitoreo móvil de PM en la ciudad de Barranquilla para evidenciar los puntos donde se presenta mayor y menor concentración de material particulado, así como la posible exposición a la que se encuentra la población vecina a las vías. Esta información puede ser utilizada como herramienta de la política pública ambiental dirigida hacia la implementación de principios de sustentabilidad, colaborando a la construcción de indicadores ambientales que ayuden a mitigar los problemas asociados la contaminación del aire e implementar estrategias de control de la contaminación. (Spiegel & Maystre, 2016; Perevochtchikova, 2013)

## 5. Marco Teórico

La contaminación del aire urbano producto de las fuentes móviles alteran la composición normal de la atmósfera. El monitoreo móvil es un método de medición de las concentraciones de PM que tiene en cuenta las variables espacio temporales y es importante para el estudio de la dinámica del contaminante y la identificación de *hot spots* a lo largo de la ruta estudiada para generar medidas de prevención y control (Palacio, Zafra, & Rodriguez, 2014; Viana, 2003).

### 5.1. Contaminación del Aire

La contaminación atmosférica ocurre por la presencia de sustancias físicas, biológicas y/o químicas en concentraciones elevadas en el aire que pueden hacer daño a los seres humanos y al medio ambiente. Los principales mecanismos de contaminación del aire son los procesos que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, azufre, material particulado, entre otros contaminantes (Martinez & Díaz, 2004), cómo se puede observar en la Figura 1.

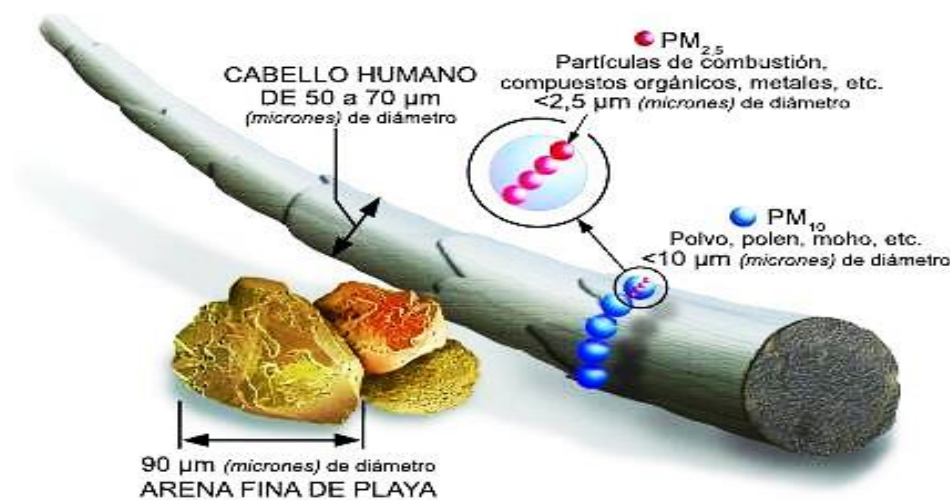


**Figura 1.** Contaminantes y fuentes de contaminación del aire

**Fuente:** Autores

## 5.2. Material Particulado

El material particulado atmosférico se define como un conjunto o mezcla compleja de partículas sólidas o líquidas, con características físicas y químicas, las cuales se encuentran suspendidas en el aire. Este contaminante puede ser emitido por fuentes de origen natural o antropogénico (Viana, 2003). Las emisiones naturales son aquellas producidas por fenómenos naturales como la resuspensión del suelo y de la sal marina, las emisiones de erupciones volcánicas e incendios. Las emisiones antropogénicas corresponden a procesos mecánicos, combustión de las industrias y del tráfico vehicular, y conforme a las propiedades del material particulado, así dependerán su origen (Borrás, 2013).



**Figura 2.** Comparación de diámetro de las partículas de PM

**Fuente:** (EPA, 2017)

El PM se clasifica principalmente por su tamaño, considerando su diámetro aerodinámico, y se divide en partículas gruesa y finas (Legarreta, Corral, Torres, & Flores, 2016). El PM<sub>2.5</sub> es el material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5  $\mu\text{m}$ , se denomina la fracción fina, y el PM<sub>10</sub> es el material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual 10

$\mu\text{m}$ , que incluye las fracciones finas y gruesas. En la Figura 2 se aprecia la diferencia del diámetro aerodinámico del  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$

El material particulado posee la capacidad de adsorber una variedad de productos químicos o elementos biológicos como metales, minerales, sales, granos de polen, esporas, cenizas, hollín, aerosoles de aceites, polvo de fuentes de combustión, gotas de rocío de lluvias ácidas, compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y endotoxinas que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos (Arrieta, 2016; Billet, et al., 2007).

Debido a su tamaño, forma y composición variada, para su identificación se han clasificado en términos de su diámetro aerodinámico que corresponde al diámetro de una esfera uniforme en unidad de densidad. El material particulado posee una amplia gama de propiedades morfológicas, químicas, físicas y termodinámicas (EPA, 2004).

El  $\text{PM}_{10}$  tiene una vida media atmosférica de minutos a horas. Entre sus mecanismos de formación están la erosión, la resuspensión de polvo y las reacciones con gases (EPA, 2009). El  $\text{PM}_{2.5}$  se caracteriza por ser soluble e higroscópico, presenta una vida media atmosférica de días a semanas y se forma mediante la condensación de gases, coagulación de partículas pequeñas y reacciones con gases atmosféricos (Quijano, Quijano, & Henao, 2010).

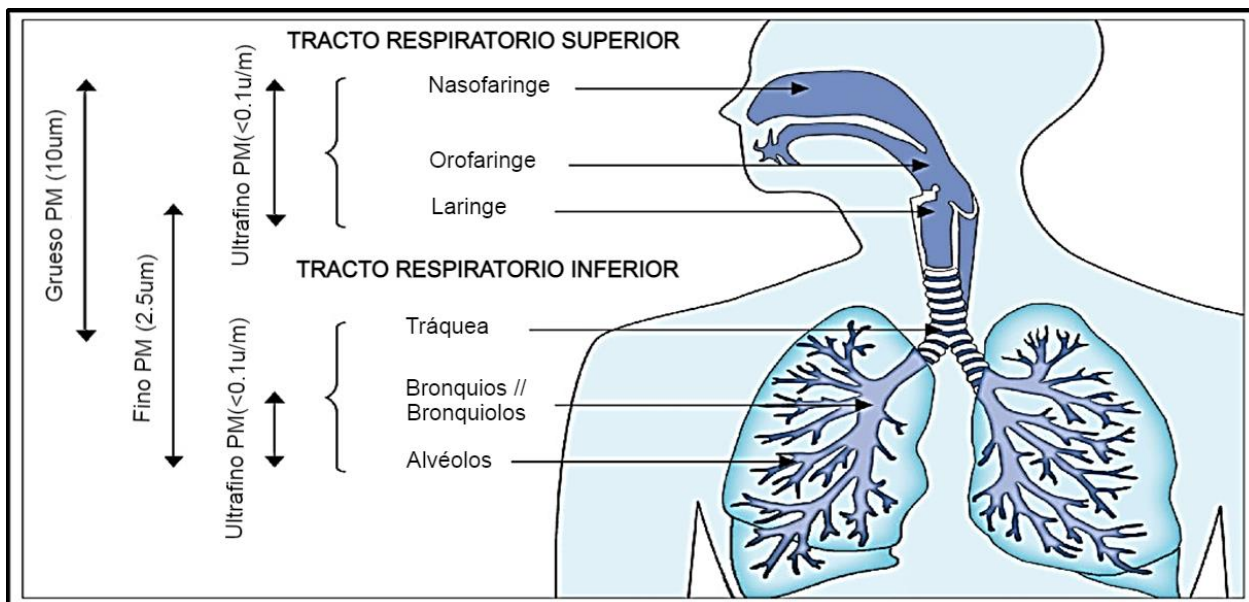
La extracción de la atmósfera del material particulado en suspensión se produce por diversos mecanismos, bien sea por deposición seca o por deposición húmeda, cuya eficacia depende esencialmente del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas (Viana, 2003).

### 5.3. Efectos a la Salud del PM

El material particulado genera toda una serie de afectaciones a la salud, de manera que el tamaño del PM se encuentra directamente asociado con el potencial para provocar enfermedades, dado que las partículas gruesas, se depositan principalmente en las vías respiratorias superiores, las partículas finas en todo el tracto respiratorio inferior, particularmente en las vías respiratorias pequeñas como los alvéolos (Wang, et al., 2018). Las partículas ultrafinas pueden depositarse tanto en el tracto respiratorio superior como en el inferior (Zoran, Savastru, Savastru, & Tautan, 2020).

Existen efectos adversos a la exposición tanto a corto como largo plazo a concentraciones elevadas de PM; la exposición continua a altas concentraciones de material particulado causa irritación de garganta, mucosas y agrava enfermedades crónicas ya existentes. Se ha demostrado que el riesgo de estos efectos a la salud aumenta con la exposición y no existe evidencia que sugiera un valor de umbral bajo el cual no existan efectos adversos a la salud (Salguero, 2016).

El PM<sub>10</sub> puede afectar tanto a los pulmones como al corazón. La exposición a la contaminación por partículas genera una variedad de afecciones a la salud como la irritación aguda de los ojos y de las vías respiratorias, muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, función pulmonar reducida, síntomas respiratorios como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar. (Li et al., 2021; Fengchao et al., 2020; Kim, Kabir, & Kabir, 2015) En la Figura 3 se puede observar los niveles de afectación del PM en el sistema respiratorio.



**Figura 3.** Capacidad de afectación de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en las regiones del sistema respiratorio

**Fuente:** (Zoran, Savastru, Savastru, & Tautan, 2020)

Mientras que, el  $\text{PM}_{2.5}$  supone un mayor riesgo para la salud, ya que influye en el desarrollo de cardiopatías y neuropatías, infartos de miocardio no mortales, latidos irregulares, así como enfermedades crónicas de obstrucción pulmonar, agravan el asma y se asocian al desarrollo de diabetes, bajo peso al nacer e influye en una disminución en el desarrollo cognitivo de los niños (Xihao et al., 2021). La exposición a la contaminación por partículas tiende a afectar en su mayoría a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños y adultos mayores (EPA, 2017; Rojas, 2004).

Una exposición a altos niveles de PM no está relacionada como causal directo de enfermedad o mortalidad respiratoria aguda, sino como un factor asociado, que en combinación con otros factores produce un aumento de las enfermedades respiratorias. Entre dichos factores se encuentra la edad del individuo (niños menores a 5 años y adultos mayores a 65 años tienen

mayor prevalencia), la existencia de antecedentes cardiorrespiratorios y cardiovasculares, mujeres en estado de gravidez, desnutrición y condiciones socioeconómicas deficientes (Pineda, 2017).

#### **5.4. Efectos del PM al ambiente**

La interacción del material particulado en el ambiente tiene impactos sobre los ecosistemas, el clima, el ciclo hidrológico, la agricultura, entre otros. Los ecosistemas se ven afectados por el material particulado atmosférico cuando éste es depositado en la superficie, las partículas actúan como soporte para otros contaminantes atmosféricos. Las partículas de mayor diámetro, tales como el polvo mineral, al depositarse sobre las hojas de las plantas, pueden reducir la capacidad de intercambio gaseoso, así como afectar a la fotosíntesis, lo cual limita el crecimiento (Kuttler & Litschke, 2008).

Cuando las partículas se depositan sobre la superficie terrestre, las concentraciones de metales presentes en el material particulado pueden afectar a las características edáficas e inhibir funciones como la toma de nutrientes por parte de las plantas (Salinas, 2011). La deposición de material particulado ácido puede provocar la acidificación de suelos, reduciendo la productividad agrícola por la pérdida de la fertilidad del suelo (Narvaez, 2019; Villacrés, 2015). Mientras que, la deposición de nitratos sobre cuerpos de agua superficiales contribuye a la eutrofización, lo cual puede repercutir sobre la composición de aguas subterráneas y sobre la vida de organismos acuáticos (Aguirre, 2010).

Las partículas tienen un papel importante en la regulación del clima, pues ejercen influencia sobre la formación de las nubes y su vida media, así como sobre el balance radiactivo global. Las

partículas en suspensión actúan como núcleos de condensación para la formación de nubes, ya que la sobresaturación en las nubes no es suficiente para iniciar la nucleación homogénea (Villacrés, 2015; Wurzler, Reisin, & Levin, 2000).

El incremento en el número de núcleos de condensación da lugar a una reducción del tamaño medio de gotas de las nubes, lo cual a su vez disminuye la posibilidad de lluvia y aumenta la capacidad de dispersión de radiación solar de las nubes. Por lo tanto, dado que la estructura de las nubes determina su vida media, su capacidad para generar precipitación y sus propiedades ópticas, se puede afirmar que el material particulado atmosférico es determinante en el ciclo global del agua (Salinas, 2011).

El material particulado atmosférico puede reducir la visibilidad y modificar el albedo (grado de potencia reflectora de la superficie terrestre), ya que tiene la capacidad de dispersar y absorber radiación dependiendo de sus características físicas y químicas, lo cual tiene efectos directos sobre el clima (WHO, 2002). Estos efectos radiactivos varían en función de su tamaño y su composición química. Las partículas minerales pueden tener efectos variables debido al amplio rango granulométrico que presentan, aunque en términos generales la absorción y retrodispersión de la radiación emitida por la superficie terrestre es mayor que la dispersión de la radiación incidente, lo cual provoca un efecto neto de calentamiento (Salinas, 2011).

Las partículas suspendidas en el aire interfieren en la transmisión de la luz en la atmósfera. La dispersión o absorción de la luz resulta en la disminución de la visibilidad, por ejemplo, los riesgos en el ecosistema incluyen un deterioro de la visibilidad debido a la neblina causada por partículas finas (Salguero, 2016; Vallero, 2014).

El viento puede transportar las partículas a través de largas distancias y luego, estas pueden instalarse en el suelo o el agua, donde según la composición química, los efectos de esta



sedimentación pueden provocar que los lagos y arroyos se vuelvan ácidos, cambiar en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales, daño en los bosques sensibles y cultivos agrícolas, generando efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas y contribución a los efectos de la lluvia ácida (EPA, 2017).

El material particulado puede deteriorar los materiales de construcción y recubrimientos, debido al depósito de las partículas en la superficie de los materiales y su interacción con ellos. Además, la reacción de las partículas depositadas con el sustrato puede dar lugar a problemas de corrosión de los materiales, especialmente en el caso de estructuras metálicas (Salinas, 2011).

### **5.5. Monitoreo Móvil**

Es un método empleado para recolectar muestras de todo tipo de contaminantes atmosféricos (óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), carbono negro (BC), material particulado (PM) y número de partículas (PN), entre otros) el cual permite cuantificar las concentraciones obtenidas de una plataforma móvil, desplegada durante un período de muestreo, haciendo de éste un método eficiente (Wen et al., 2019). El monitoreo móvil es utilizado para identificar los principales contribuyentes de una fuente, como es el tráfico, caracterizar los patrones de emisión de los vehículos y las concentraciones de contaminantes. (Deshmukh et al., 2020)

Otra aplicación del monitoreo móvil es el mapeo de la calidad del aire urbano. Es útil para identificar fuentes contaminantes cercanas y hot spots a lo largo de la ruta de viaje (Adams & Kanaroglou, 2016). Además, juega un papel vital en las medidas de reducción y otras decisiones políticas como el mejoramiento del plan de gestión del tráfico, cambios en la infraestructura

existente, desviación de los vehículos, etc. (Cole-Hunter, Morawska, Stewart, Jayaratne, & Solomon, 2012).

El monitoreo móvil se realiza en diferentes microambientes, es decir, hogar, oficina y transporte (caminar, bicicleta, automóvil, tren y autobús) para cuantificar la concentración de exposición humana y las dosis de inhalación (Kaur, Nieuwenhuijse, & Colville, 2007). Se compararon varios microambientes resultando ser la dosis de inhalación durante el tráfico más alta que en otros microambientes (Dons, Panis, Martine, Theunis, & Wets, 2012). Otros estudios recientes encontraron que el microambiente del tráfico tiene una contribución importante a la concentración total de exposición a los contaminantes del aire y su dosis (Gurram, Stuart, & Pinjari, 2015). Los resultados de estos estudios se utilizan para evaluar los riesgos hacia la salud y también ayudan a planificar políticas y medidas de reducción (Cole-Hunter, Morawska, Stewart, Jayaratne, & Solomon, 2012).

En los últimos años está aumentando el desarrollo y la aplicación de sensores de bajo costo para el monitoreo móvil de la calidad del aire (Shiva, Pavan, Narayana, Seema, & Pooja, 2019). Hasta ahora, el monitoreo móvil se lleva a cabo en zonas residenciales, zonas de tráfico, cascos urbanos, zona costera, centro industrial, cerca del aeropuerto y zonas portuarias (Apparicio, Carrier, Gelb, Séguin, & Kingham, 2016; Tunno, et al., 2012).

El monitoreo móvil tiene la ventaja de cubrir una gran área de muestreo en un período más corto, y puede establecerse utilizando instrumentos rentables de calidad del aire y plataformas móviles (Lim et al., 2019). Por lo tanto, el monitoreo móvil se ha convertido en una alternativa a las estaciones de monitoreo estacionarias ya que puede mejorar la evaluación de la calidad del aire al aumentar el número de sitios de muestreo y poder reflejar de manera precisa el estado de

la calidad y las tendencias de los contaminantes del aire en una región específica (Deshmukh et al., 2019; Li et al., 2019).

## **6. Estado del arte**

Abordar los problemas de contaminación del aire en las ciudades en crecimiento se ha convertido en un problema prioritario a nivel mundial (OMS, 2018), debido a que el tráfico vehicular es cada vez mayor en las áreas urbanas densamente pobladas. La industrialización extendida y el alto consumo de energía ha llevado a un aumento significativo de las emisiones urbanas, en ocasiones superando los valores máximos permisibles propuestos por la Organización Mundial de la Salud (Querol, 2018); siendo el PM uno de los contaminantes globales clave que afectan la salud humana (Engel-Cox, NguyenThi, Donkelaar, Martince, & Zelld, 2013). Como consecuencias de esto, existe un creciente interés por el estudio de la dinámica de los contaminantes y los efectos que pueden generar en la salud y el medio ambiente usando la metodología de monitoreos móviles (Simona, Dupont, Chery, Camargo, & Cai, 2019).

El estudio del monitoreo móvil de la calidad del aire está atrayendo un interés cada vez mayor por las repercusiones que genera (Merbitz, Fritz, & Schneider, 2012). Como resultado de las investigaciones recientes han permitido el desarrollado de varios dispositivos para monitorear en tiempo real la variabilidad espacial y temporal de la calidad del aire utilizando diferentes instrumentos, tecnologías y plataformas. En la actualidad, los dispositivos móviles se pueden utilizar para monitorear con alta resolución espacial del PM (Van den Bossche, et al., 2015; Patton, et al., 2014).

En Shenyang, China, se analizaron las características de distribución del material particulado ( $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ) por medio de las concentraciones medidas en las 2 principales carreteras de Shenyang, con un sensor de partículas Plantower, ubicado en la parte superior del

vehículo y a 1,5 m del suelo. Las concentraciones de contaminantes del aire se midieron en tiempo real cuando el vehículo circulaba por la carretera. Realizaron tres monitoreos entre las 16:00 y 20:00 horas el 13 de diciembre de 2018, el 7 de enero de 2019 y el 4 de marzo de 2019 a lo largo de dos carreteras principales que atraviesan las direcciones este-oeste y norte-sur del área de cuatro anillos de Shenyang. Estas se dividen en 42 secciones en el este-oeste y 32 norte-sur cada tramo de 1 km calculando la concentración promedio de contaminantes en cada sección (Li et al., 2020). Las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  y puntos críticos en el tramo oeste y sur de las carreteras principales fueron similares. No obstante, los patrones de distribución de los contaminantes en los tres monitoreos eran diferentes (Li et al., 2020).

Igualmente, en Cangzhou, China, evaluaron el monitoreo móvil, en el cual utilizaron 50 taxis para mapear los niveles de contaminación del aire, con un sensor de partículas láser (SDS019-TRF) y midieron las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ . El monitoreo se llevó a cabo del 1 de enero al 31 de octubre de 2019 continuamente, durante 12 horas. Los taxis fueron equipados con monitores montados dentro de la caja de luz del techo, lo que representa una altura de respiración típica (Wu et al., 2020). Los datos recopilados por el monitoreo móvil y los monitores fijos se compararon utilizando medidas estadísticas estándar que incluyen el error relativo, el sesgo fraccional, el error cuadrático medio normalizado, varianza y coeficiente de correlación. Comprobando el potencial de aplicar monitoreo móvil, obteniendo mapas de alta resolución de la contaminación del aire en zonas urbanas. Los resultados de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  indicaron que los meses de invierno tuvieron una mala calidad del aire en comparación a los meses de verano. Posiblemente por es el uso del sistema de calefacción central en el norte de China (ubicado en Cangzhou), alimentado principalmente por carbón, lo que conduce a un aumento de la contaminación del aire (Wu et al., 2020).

En São Paulo, Brasil, (Créso et al., 2021) evaluaron la exposición a los contaminantes del aire en los microambientes de tránsito, realizando mediciones de PM con contadores de partículas de condensación portátiles (P-Trak 8525 y CPC 3007) en dos líneas del metro, reportando concentraciones en los andenes y en los trenes. Los datos les permitieron mapear su distribución espacial e identificar los impulsores de su variabilidad espaciotemporal. Con este estudio únicamente se midieron las concentraciones del PM obteniendo una desviación estándar promedio de  $(0,23 \pm 0,83 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ .

En Santiago, Chile (Suarez et al., 2014) compararon la exposición a partículas finas en viajeros que utilizan diferentes modos de transporte (bicicleta, autobús, automóvil y metro), con muestreadores personales en una ruta concurrida. Los impactos del tráfico variaron según los modos de transporte. Las estimaciones de los impactos del tráfico en la exposición personal a  $\text{PM}_{2.5}$  fueron para automóvil ( $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), bicicleta ( $13,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), metro ( $16,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), autobús ( $17,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Debido a que la ventilación por minuto (volumen de aire por minuto) de los ciclistas, que estimaron a partir de la frecuencia cardíaca medida, era el doble de la ventilación por minuto de los pasajeros de automóviles y autobuses, determinaron que las dosis de contaminación del aire inhalado fueron las más altas para los ciclistas (Suarez et al., 2014). La exposición de los viajeros en las horas pico se vio significativamente influenciada por el modo de transporte, la ruta y el tipo de combustible.

En Bogotá, Colombia, se evaluó la calidad del aire mediante un laboratorio móvil en la localidad de Puente Aranda la cual ha sido reportada una zona de alta contaminación atmosférica, principalmente debido a que las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  exceden los límites legislativos. Los contaminantes atmosféricos fueron medidos por el laboratorio móvil durante el periodo de

muestreo un poco más de 8 meses para  $PM_{10}$ ,  $NO_x$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ,  $CO$  y  $O_3$ . Con respecto a la legislación colombiana, los resultados muestran que  $PM_{10}$  (24 horas) es el contaminante atmosférico que presenta el mayor número de excedencias durante el período de investigación (47,3%). Las concentraciones de  $PM_{10}$  registradas por el laboratorio móvil (zona central) son en promedio 2,30 y 2,01 veces superiores a las registradas por las estaciones móvil y fija de la ciudad (Palacio, Zafra, & Rodriguez, 2014).

En Barranquilla, Colombia, se evaluó la variabilidad espacial de las concentraciones de Black Carbon (BC) (Blanco, 2019). Este es un tipo de contaminante emitido por la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa. En estas investigaciones se determinaron las concentraciones de BC usando monitoreo móvil en tiempo real a velocidades inferiores a 30 km/h, utilizando un microaethalómetro (MA200) para obtener las concentraciones de BC en simultaneo con un GPS. Los resultados para el muestreo ambiental evidencian que prevalecen las emisiones de tráfico vehicular, pero igualmente es influenciado por la quema de biomasa. La concentración media de BC ambiental fue  $1,04 \pm 1,03 \mu g/m^3$  y para las mediciones móviles fue de  $16,1 \pm 16,5 \mu g/m^3$ . La distribución espacial de las concentraciones de BC muestran que las emisiones de tráfico y la congestión de vehículos, consecuencia de la infraestructura vial y de transporte, son los factores que más afectan las concentraciones de BC. Fueron tenidas en cuenta las variables meteorológicas señalando una correlación entre las variables de humedad relativa, temperatura y velocidad del viento (Blanco, 2019).

## **7. Metodología**

### **7.1. Tipo de estudio**

Esta investigación comprende dos tipos de estudio: descriptivo y correlacional. El enfoque descriptivo busca obtener conocimiento científico del material particulado, al medir las concentraciones en las principales vías de la ciudad de Barranquilla, describiendo y analizando la variación espacio temporal de las concentraciones de material particulado ante distintas variables de tráfico y uso de suelo e identificando las características principales  $PM_{10}$  y el  $PM_{2.5}$ , y la problemática que genera.

Así mismo, desde el enfoque correlacional se visualizan las variables y cómo se relacionan con el contaminante, o por el contrario no existe relación entre ellos. Cabe resaltar que esta investigación es de tipo cuantitativo, pues se evaluaron las variables medidas para posteriormente ser analizadas utilizando métodos estadísticos e informáticos.

### **7.2. Área de estudio**

Barranquilla, capital del departamento del Atlántico, está ubicada en la costa Caribe colombiana, posee una elevación media de 18 m.s.n.m., su clima es de tipo tropical seco y se caracteriza por dos periodos: uno húmedo, que va desde abril a noviembre y otro seco, desde diciembre a marzo. Las temperaturas más elevadas se presentan entre los meses de mayo y septiembre con temperaturas mayores a 28 °C (Barranquilla Verde, 2018). Su economía se basa en el comercio y la industria, siendo así el principal centro económico de la Región Caribe de Colombia (Aguilera, 2013).

Las vías principales de la ciudad de Barranquilla son: la Vía 40, Calle 30 y Avenida Circunvalar; vías estratégicamente escogidas para el desarrollo de la investigación por la dependencia e importancia que tienen a nivel de movilidad en la ciudad. Estas carreteras rodean el casco urbano y son indispensables para llegar a cualquier destino, así como para entrar y salir de la ciudad, son transitadas por todo tipo de vehículos. En estas vías principales se encuentran gran cantidad de empresas dedicadas al sector industrial, transporte, alimentos, bebidas, saneamiento, tecnología, productos químicos, entre otras. Se encuentran ubicados los parques Comerciales e Industriales vía 40, Internacional del Caribe, Zona Express y Caribe Verde que son conjuntos cerrado de bodegas industriales dentro de las cuales se efectúan actividades comerciales e industriales aprovechando su cercanía al puerto fluvial (Secretaria Distrital de Planeación de Barranquilla, 2016).

Las empresas se encuentran estratégicamente ubicadas cerca a estas vías porque son las arterias principales de la ciudad de Barranquilla. Por lo tanto, cuentan con la cercanía a otros centros comerciales, bancos, las principales empresas industriales de la ciudad, como también, el fácil acceso a la Sociedad Portuaria, la Dirección de Impuestos y Aduana Nacionales (DIAN), Avenida del Rio y Avenida Murillo (Alcaldia de Barranquilla, 2019; Secretaria Distrital de Planeación de Barranquilla, 2016).

La ciudad de Barranquilla posee cuatro sectores productivos, la industria, los servicios, el comercio y el transporte. Sobresalen, entre ellos, la actividad industrial manufacturera, metalmecánica, la producción de alimentos y bebidas, las confecciones y las sustancias químicas (Area Metropolitana de Barranquilla, 2021; Alcaldia de Barranquilla, 2019).

Barranquilla tiene una población de 1.274.250 personas (DANE, 2020) y un parque automotor total de 202.827 vehículos registrados en el tránsito de Barranquilla hasta el mes de



marzo del 2021: vehículos tipo automóvil (101.352), camioneta (36.444), motocicletas (30.199), campero (10.479), semirremolque (7.397), bus (4.930) y camión (3585) (Alcaldía de Barranquilla, 2020).

En la Figura 4 se puede evidenciar la representación gráfica de los usos de suelo en la ciudad de Barranquilla, tales como: comercial, actividad central, industrial, portuario, residencial, espacio público, institucional, suelo de protección y reserva, público propuesto y suelo de expansión urbana. Estos se tendrán en cuenta en esta investigación para analizar la posible relación que este pueda generar en las concentraciones medidas de material particulado.

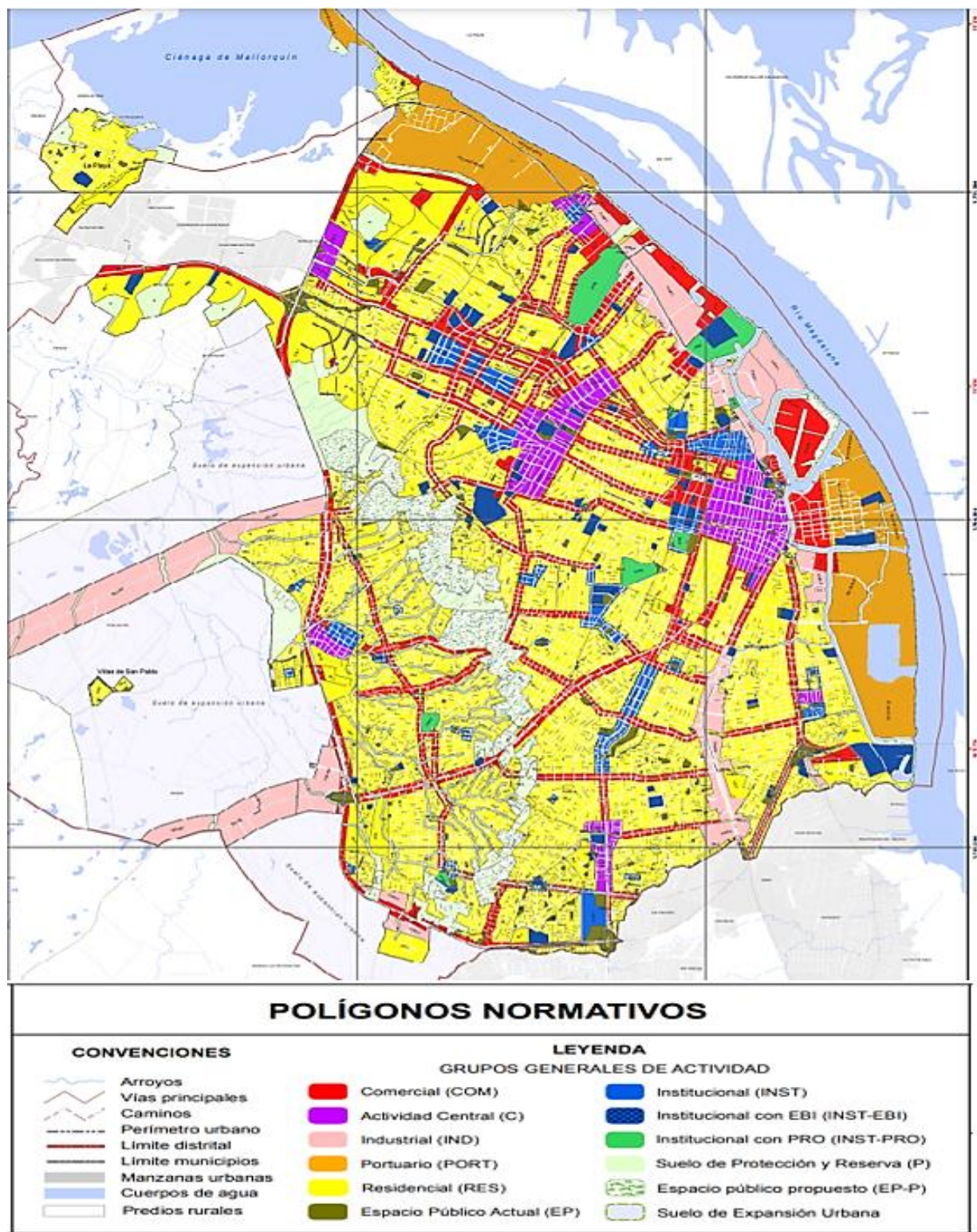
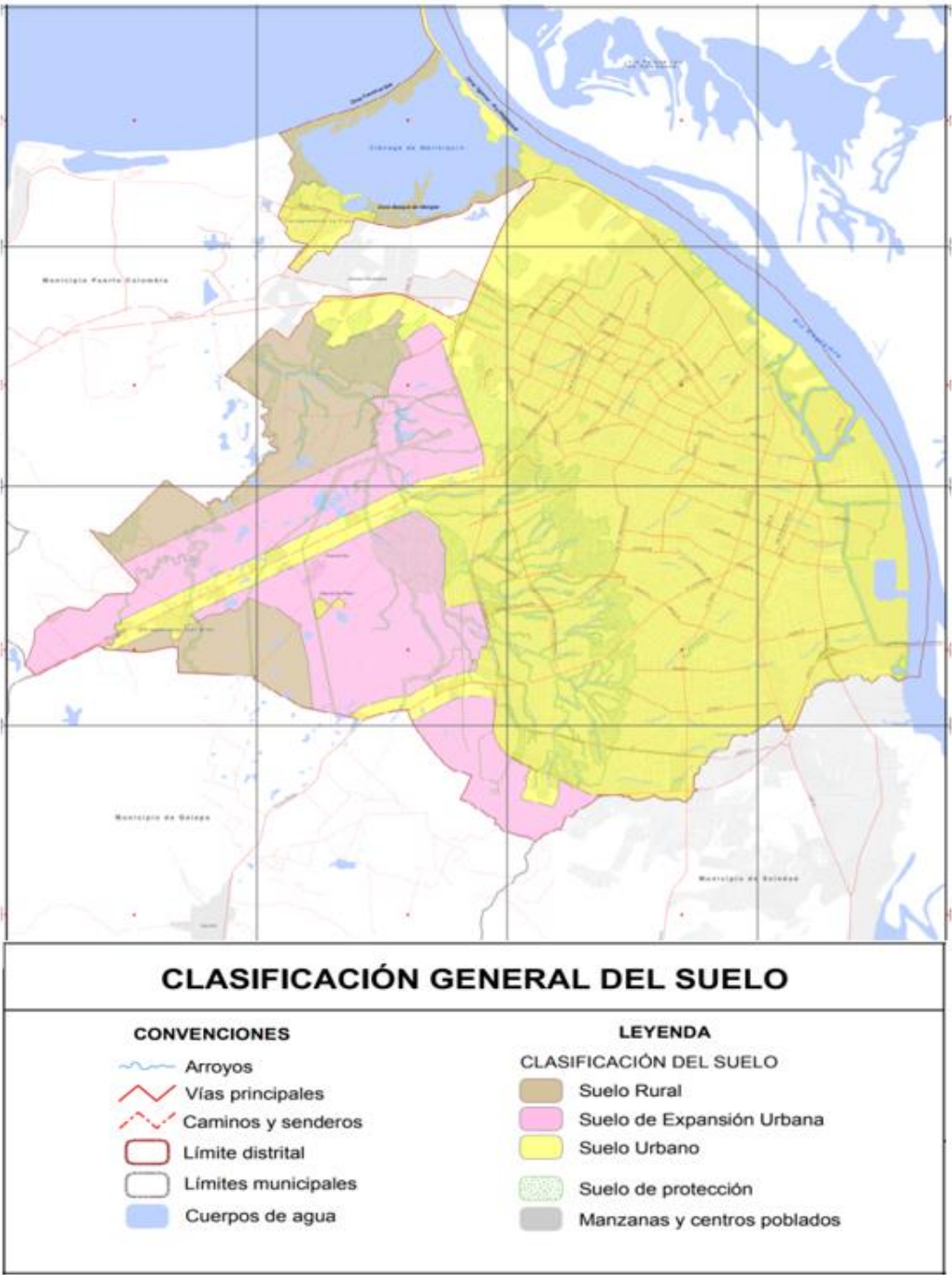


Figura 4. Usos del suelo de la ciudad de Barranquilla.

Fuente: (Alcaldia de Barranquilla, Usos de suelo, 2018)



**Figura 5.** Clasificación del suelo de la ciudad de Barranquilla

**Fuente:** (Alcaldia de Barranquilla, Usos de suelo, 2018)

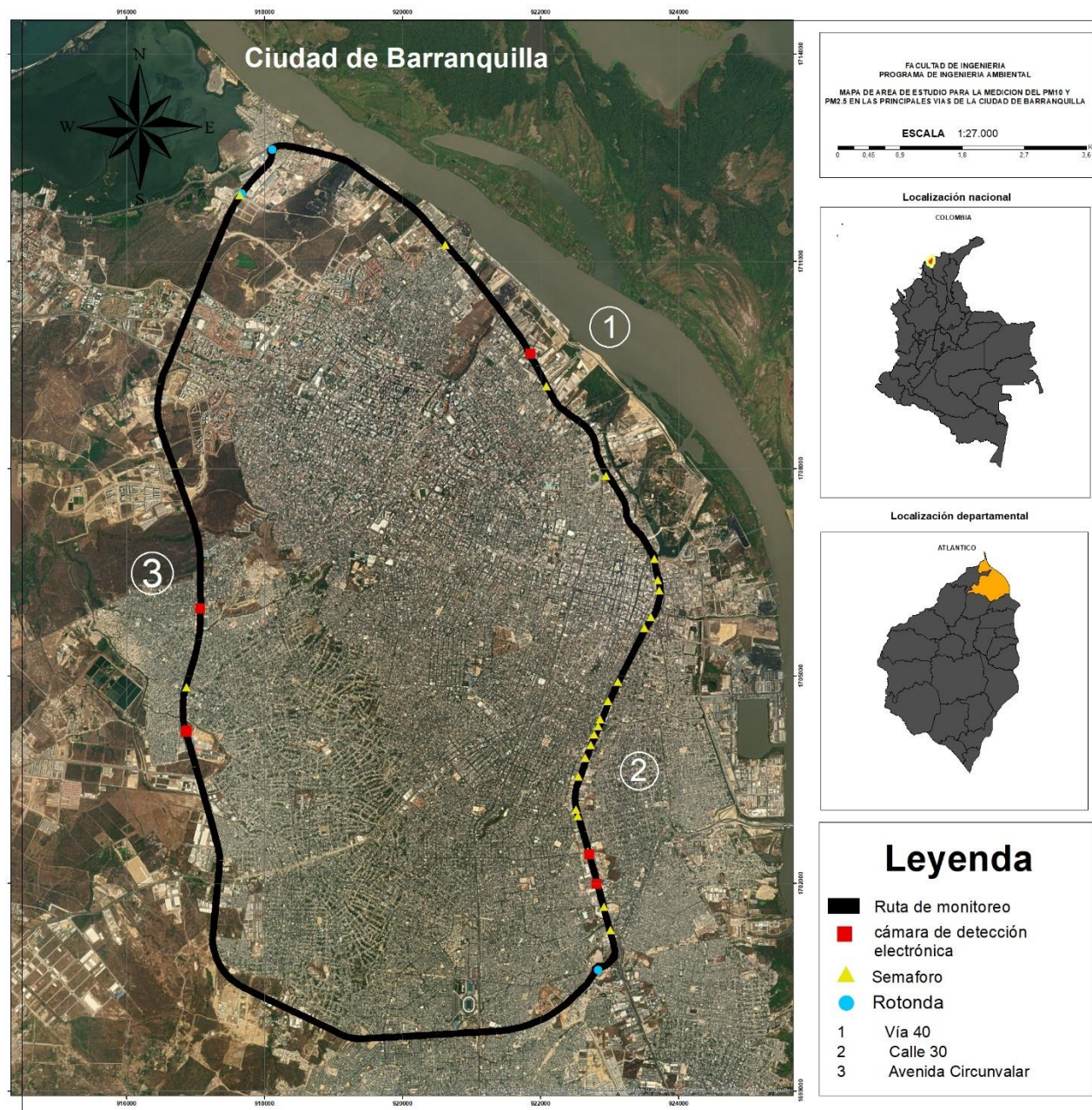
Barranquilla posee en su clasificación de ordenanza 5 tipos de suelos: suelo rural, suelo de expansión urbana, suelo urbano, suelo de protección, manzanas y centros poblados como se puede evidenciar en la Figura 5. Solo se tendrá en cuenta el suelo urbano, la investigación se lleva a cabo en la zona demarcada con color amarillo y va dirigida a la contaminación generada por las fuentes móviles en los ambientes urbanos.

### **7.3. Recolección de datos**

La ruta del monitoreo móvil de PM se llevará a cabo desde la Vía 40, siguiendo hasta llegar a la Calle 30 y Avenida Circunvalar retornando al punto de partida direccionada de norte a sur con una distancia total de 35,9 km de recorrido como se evidencia en la Figura 6. A lo largo de la ruta están ubicados 18 semáforos y 1 cámara de foto detección en la Calle 30, 2 semáforos y 2 cámaras de foto detección en la Avenida Circunvalar y 3 semáforos y 2 cámaras de foto detección en la Vía 40.

La ruta para el muestreo móvil (*sampling route*) se seleccionó teniendo en cuenta la afluencia vehicular y la ubicación estratégica de la ruta puesto que bordea toda la periferia de la ciudad, como se puede ver en la Figura 6. Por lo tanto, tiene una influencia de los diversos entornos en el área urbana de la ciudad de Barranquilla.





de partículas láser portátil, que mide simultáneamente seis tamaños de partículas configurables por el usuario a partir de opciones seleccionadas ( $PM_{0.5}$ ,  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_5$ ,  $PM_{10}$  y PTS) con una tasa de flujo de 2,83 l/min. Cuenta con un microprocesador interno que analiza y muestra los resultados (recuentos totales, número de concentración, concentración de masa, valores de PM, tipo de partículas y corrección). Además de permitir la determinación del número de partículas, permite determinar la concentración de partículas de PM en  $\mu g/m^3$ , unidad de medida utilizada en ese estudio. El equipo es fabricado en los EE. UU. y cumple con las normas internacionales (JIS B 9925: 1997 e ISO21501 e ISO14644-1) y tiene certificación CE. Cuenta con alta sensibilidad, múltiples capacidades funcionales y un tiempo de funcionamiento prolongado. Es compacto, delgado y liviano (RemedyOne, 2020).

La preparación del contador de partículas portátil antes de cada campaña de muestreo consistió en colocar a muestrear el equipo por 15 minutos, revisar la sincronía con el GPS y la verificación de la configuración del muestreo para así garantizar la validez de los datos y la precisión de las coordenadas suministradas por los equipos.

El monitoreo móvil se realiza ubicando el contador de partículas en la parte superior de un automóvil a una altura de 1,60 m (altura de un peatón adulto promedio) como se evidencia en la Figura 7. Se instaló una estructura de madera que le brindará estabilidad y protección al equipo como se evidencia en el punto B de la Figura 7. El equipo se encuentra cubierto y solo queda expuesta la boquilla para la absorción de aire como se evidencia en el punto A (Fachingera, Drewnicka, & Borrma, 2021). La entrada de aire del equipo se encuentra en la parte superior del vehículo, lo más alejado del escape, para minimizar el potencial de auto contaminación (Larson et al., 2017).



**Figura 7.** Plataforma móvil para la medición de material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>).

**Fuente:** Autores

Conforme indicado, el contador de partículas mide en simultaneo seis tamaños de partículas, de las cuales solo se tendrá en cuenta PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Las mediciones se realizarán en un intervalo de 10 segundos (Crocchianti et al., 2021) consiguiendo así la mejor relación señal-ruido (*signal-to-noise*), datos obtenidos tras comparar los resultados de concentración en intervalos de muestreo de 5s, 10s, 15s, 20s, 25s y 30s como se evidencia en el anexo 20. Los datos obtenidos para 5s presentaron muchas fluctuaciones en la determinación de las concentraciones y de esta manera se optó por ampliar el intervalo de muestreo a 10 seg. No se tuvieron en cuenta tiempos superiores a 10 segundos puesto que, a mayor tiempo, mayor distancia entre puntos de muestreo, lo que afectaría la distribución espacial de las concentraciones de PM (Larson, et al., 2017).

El tiempo de 10s corresponde al intervalo en que el equipo puede ser comparado con otros instrumentos de medición del mismo contaminante para un futuro estudio de la eficiencia entre distintos equipos de medición de PM. La posición y la velocidad del vehículo se registrarán en simultaneo con el contador de partículas continuamente cada 10 segundos utilizando un sistema de posicionamiento global (GPS; Garmin Oregon 350). Junto a él se empleó un teléfono móvil para registrar las condiciones especiales observadas a lo largo del camino (es decir, fotografías, actividad del tráfico, cualquier fuente adicional de contaminación, entre otros) (Kabindra et al., 2019). Los resultados de posición global dados por el GPS fueron examinados para medir la velocidad y la distancia de cada campaña de monitoreo móvil (Blanco, 2019).

Para definir la velocidad de muestreo en la cual se desarrollaría la metodología de monitoreo móvil fueron tenidas en cuenta las velocidades de 20 km/h, 30 km/h y 40km/h, y conforme a los resultados obtenidos en los premuestreos, fue seleccionada como velocidad ideal de monitoreo 30km/h. Esta velocidad intermedia ofrece mejor calidad en los datos obtenidos de concentración de PM. Además, algunas investigaciones reportaron óptimos resultados a esa velocidad de muestreo (Deshmukh, et al., 2020; Blanco, 2019). Las vías muestreadas permiten conducir a una velocidad baja, lo que permite obtener alta resolución espacial de las concentraciones obtenidas (Fachingera, Drewnicka, & Borrmann, 2021).

Fue realizado un premuestreo en el mes de junio y nueve monitoreos móviles en los meses de julio y agosto de 2019. Los muestreos fueron realizados en días hábiles, iniciaban a las 14:00 horas y terminaban entre las 16:00 y 17:00 horas con una distancia total recorrida de 35,9 km. El horario fue escogido teniendo en cuenta la altura de la capa de mezcla y las condiciones climáticas que podría afectar la medición de los contaminantes y las condiciones del equipo.



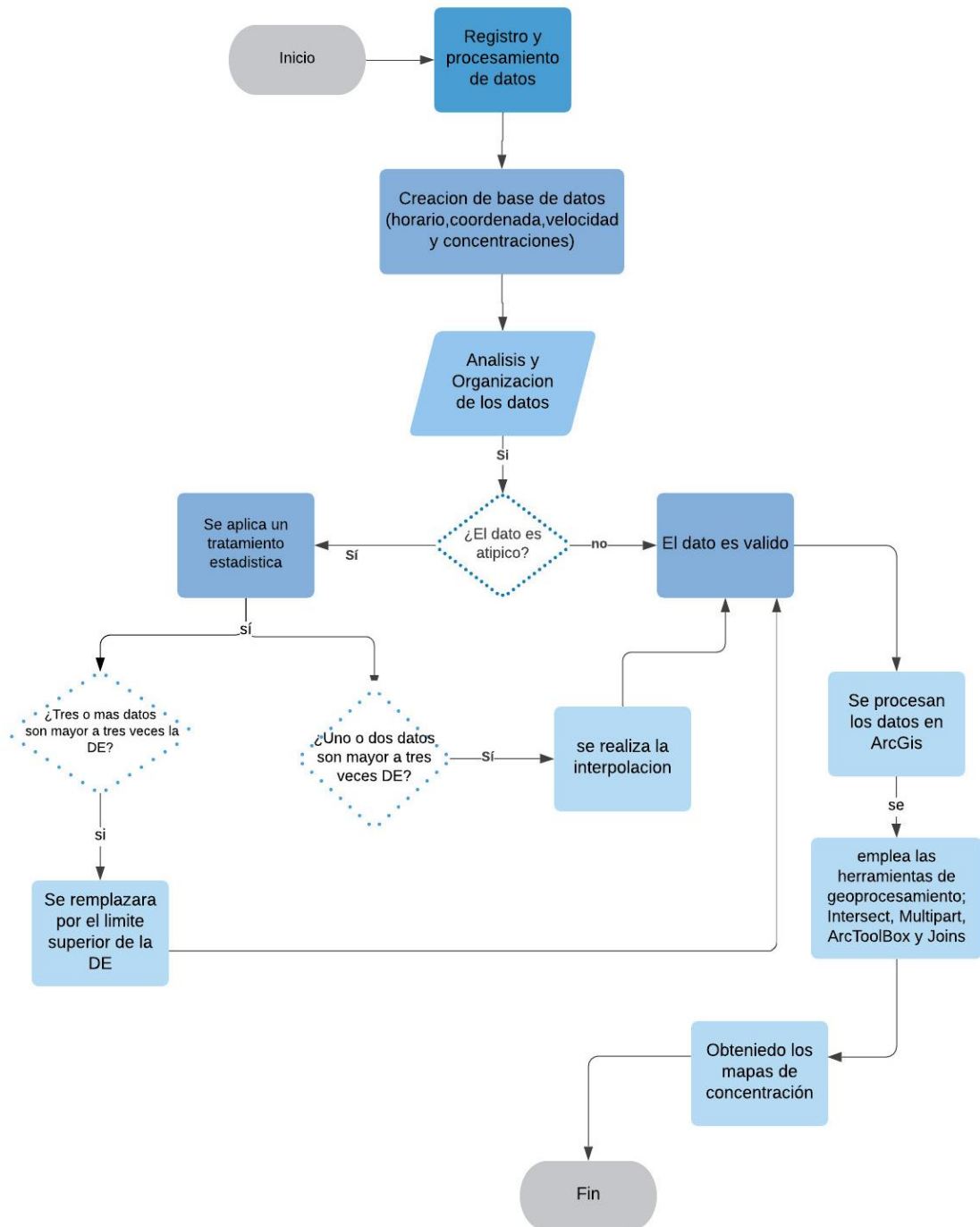
La altura de la capa de mezcla es mayor entre las 12 y 18 horas ( Benavides Nieves & Mojica Godoy, 2019). En las primeras horas de la mañana, por el aumento gradual de la temperatura la altura de capa de mezcla comienza a aumentar, ampliando su espesor, entre mayor sea la altura de mezcla, mayor será la dispersión de los contaminantes (Puigcerver & Carrascal, 2012). Este fenómeno se le atribuye a la radiación solar, la cual calienta el ambiente y crea episodios de inestabilidad atmosférica y mayor turbulencia, generando un escenario favorable para una mayor dispersión de los contaminantes (Rodriguez, Quintero, Gonzales, Cuesta , & Sanchez, 2015). En este sentido en las últimas horas de la tarde se alcanzan las mayores alturas de mezcla y en las horas de noche y madrugada las más bajas (Ingetec, 2017).

La altura de capa de mezcla es un factor que influye directamente en la dispersión de contaminantes atmosféricos, en este caso de material particulado, ya que representa el volumen de aire que tienen para dispersarse (Nuñez, 2004). El comportamiento general o significativo es una relación inversamente proporcional ( Benavides Nieves & Mojica Godoy, 2019). En esta investigación no se evaluaron las condiciones meteorológicas, puesto que el monitoreo móvil realiza la medición de las concentraciones de material particulado muy cerca de la fuente por lo que las variables meteorológicas no generan una influencia significativa a las concentraciones medidas por el equipo en campo.

#### **7.4. Registro y procesamiento de los datos**

Los datos obtenidos en los 9 monitoreos móviles realizados se integrarán en una base de datos con una frecuencia de 10 segundos, en este sentido, el contador de partículas portátil HAL- HPC601 genera en promedio 562 datos por cada contaminante durante el período de muestreo,

con información registrada del horario, coordenadas, la velocidad y las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en simultaneo. En la Figura 8 se observa el diagrama de flujo para el registro y procesamiento de los datos.



**Figura 8.** Diagrama de flujo del registro y procesamiento de los datos

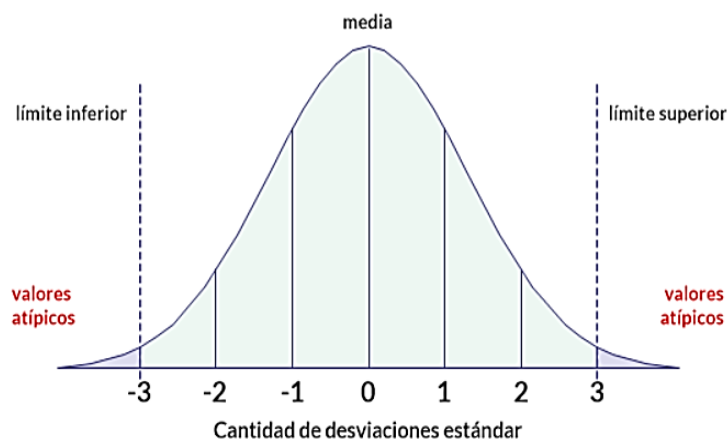
**Fuente:** Autores.

La información que ofrece el equipo es analizada, ordenada y exportada a Excel seleccionando los datos necesarios para su análisis; registro de fecha, hora, concentración del contaminante y posición global. En el análisis de los datos de concentración, se identificaron los datos atípicos a través del análisis de la desviación estándar; usada para determinar los límites superior e inferior del intervalo de confianza de los datos de concentración recolectados.

El procedimiento es el siguiente:

Se calcula el promedio y se realiza el cálculo de la desviación estándar de los datos de concentración obtenidos para un conjunto de valores, definido como intervalo de confianza  $\bar{x} \pm 3S$ .

Al sumar y restar el promedio multiplicado por tres veces la desviación estándar obtendremos los valores extremos (*Lim. inf* y *Lim. sup*) como se aprecia en la Figura 9.



**Figura 9.** Límites de valores atípicos de  $\pm 3$  desviaciones estándar respecto de la media.

**Fuente:** (Galvanize, 2019)

Los valores que superan las +3 desviaciones estándar respecto de la media, o son inferiores a -3 desviaciones estándar, se incluyen como valores atípicos en los resultados de la salida. Estos datos son marcados y posteriormente corregidos.

En la corrección de los datos de concentración se establecen dos criterios: si uno o dos concentraciones de PM son mayores a tres veces la desviación estándar, se realiza una interpolación; método estadístico que consiste en hallar un dato dentro de un intervalo en el que conocemos los valores en los extremos para hallar una serie de puntos intermedios. La idea básica es conectar los 2 puntos dados en  $x_i$ , es decir  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_1, y_1)$ , para cualquier punto entre los dos valores de  $x_0$  y  $x_1$  se debe seguir la ecuación de la línea:

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (1)$$

Que se deriva geométricamente. En lo anterior, el único valor desconocido es  $y$ , que representa el valor desconocido para  $x$ , despejando queda:

$$y = y_0 + (x - x_0) \left( \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) \quad (2)$$

Asumen autocorrelación espacial y estiman los valores de  $(y)$  como una media de los valores de un conjunto de puntos de muestreo cercanos (Mora, 2000)

Y si tres o más datos continuos son mayores a tres veces la desviación estándar se reemplazará por el límite superior definido por  $\bar{x} \pm 3S$ .

Una vez analizados y corregidos estadísticamente los datos, se procesan en el programa ArcGIS.

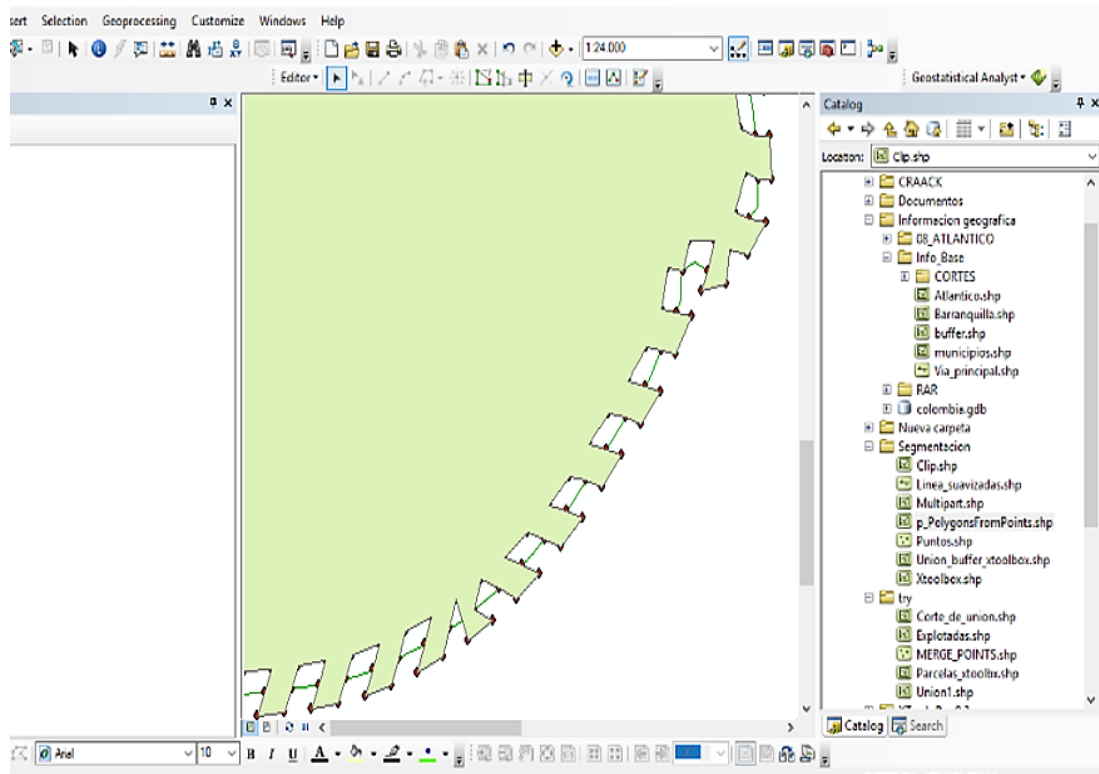
Para el modelado de las concentraciones de PM se usaron las variables de zona de influencia, son variables específicas del área local, que se promedian sobre un área de influencia definida (Su et al, 2015). Se analiza la información espacial en cuadrículas de 100 m por 100 m de resolución y se grafican los valores medidos utilizando todos los puntos de datos de medición recopilados por el contador de partículas HPC601 dentro de cada celda de la cuadrícula. Este proceso ofrece mapas resueltos espacialmente de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> medidas a lo largo de la ruta de monitoreo (Deshmukh et al., 2020).

Se determinó la resolución espacial de presentación de datos, correspondiendo el tamaño de celda del mapa, en polígonos de 100 m x 100 m dimensiones dadas por la relación de la fórmula de velocidad;

$$v = \frac{d}{t} \qquad v \cdot t = d \qquad (3)$$

Teniendo en cuenta la velocidad constante de muestreo dada en m/s multiplicado por el intervalo de tiempo de muestreo en segundos. Se definió una distancia de 100 m como intervalo espacial para crear grupos de puntos de agregación igualmente espaciados a lo largo de la ruta del monitoreo móvil con un total de 334 polígonos para representar las concentraciones promedio de PM, creando un *Shape File* llamado “Segmentación”

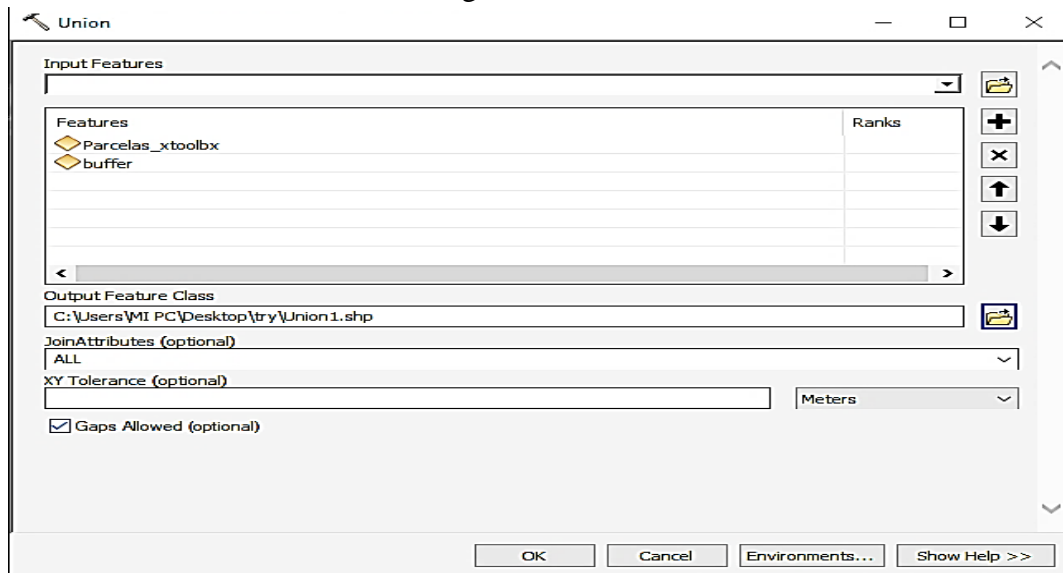
Esta capa de agregación de datos con polígonos igualmente espaciados es creada con la herramienta de ARCGIS (XtoolBox) con la opción Polygons from points como se evidencia en la Figura 10.



**Figura 10.** Resultado de la herramienta XtoolBox

**Fuente:** Autores

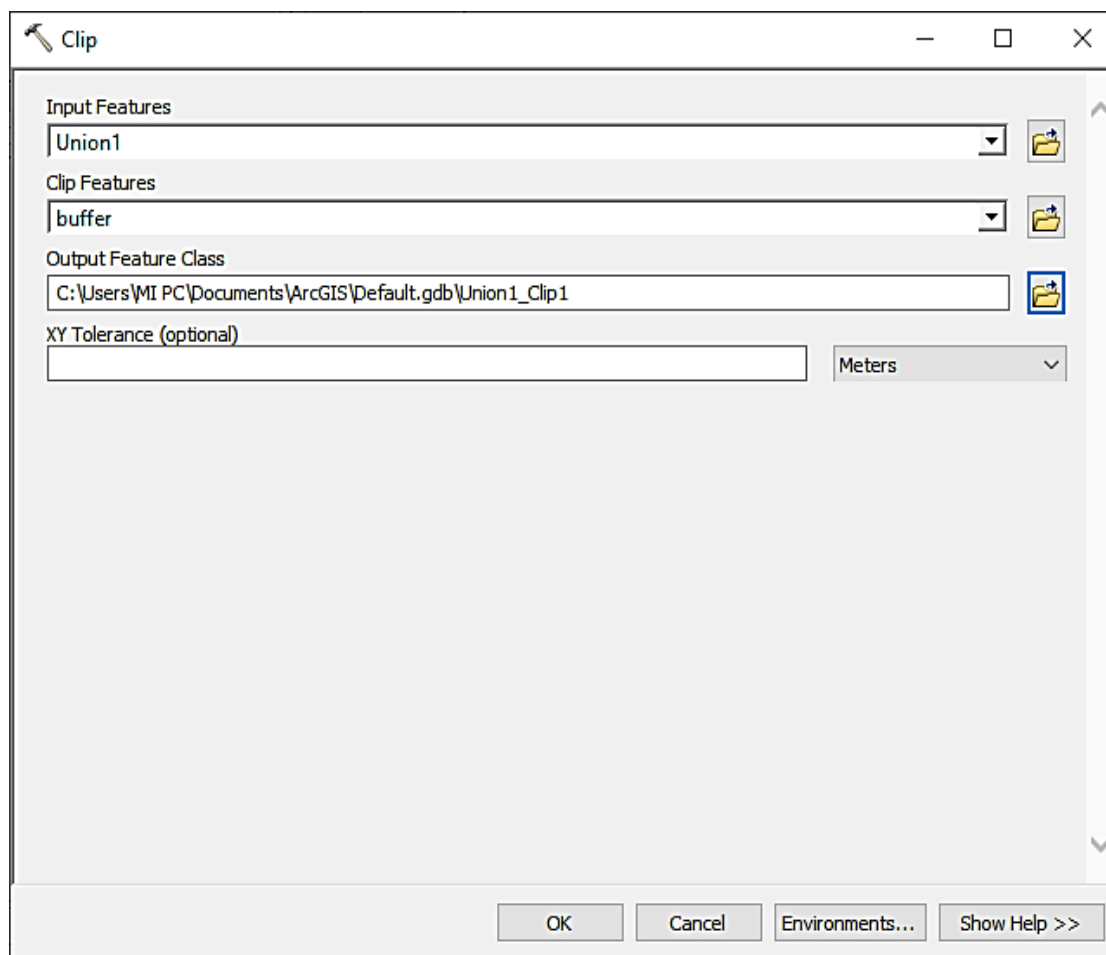
Se realiza una unión, en la entrada de datos se adjunta el shapefile realizado con la herramienta XtoolBox, a su vez el buffer de la vía principal y en la salida se ubica la carpeta de almacenamiento como se evidencia en la Figura 11.



**Figura 11.** Herramienta UNION realizada en ArcGis

**Fuente:** Autores

A continuación, se realiza un corte entre el buffer y la unión, en la entrada se adjunta la unión y en el clip adjuntamos el Buffer, en la salida se ubica la carpeta de almacenamiento como se evidencia en la Figura 12.

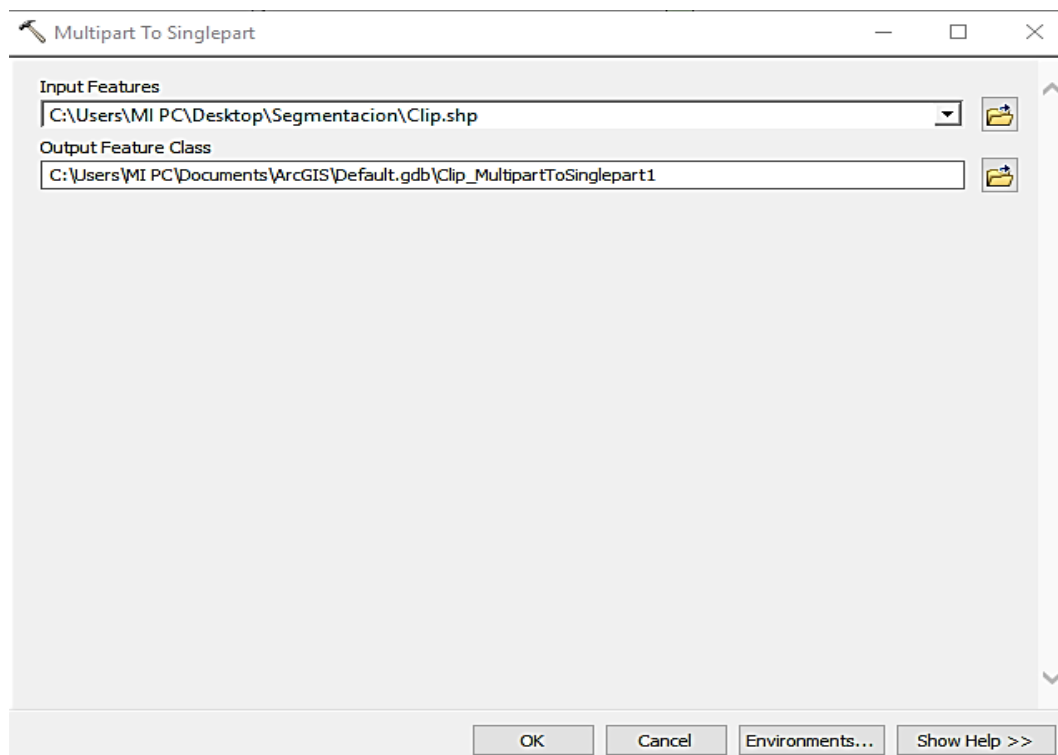


**Figura 12.** Herramienta CLIP realizada en ArcGis

**Fuente:** Autores

Posterior a esto se realiza una división con una herramienta que se llama “*Multipart to singlepart*”. Esta herramienta permitirá exportar todos los polígonos. En la entrada se adjunta el clip y en la salida se ubica la carpeta de almacenamiento como se evidencia en la Figura 13.

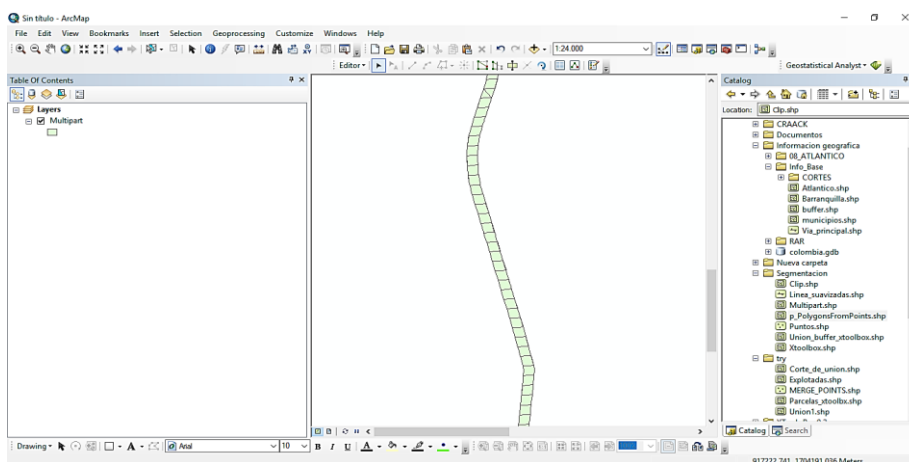




**Figura 13.** Herramienta Multipart to Singlepart.

**Fuente:** Autores

Como resultado se obtiene la segmentación, con 334 polígonos, como se evidencia en la Figura 14.



**Figura 14.** Shapefile de segmentación

**Fuente:** Autores

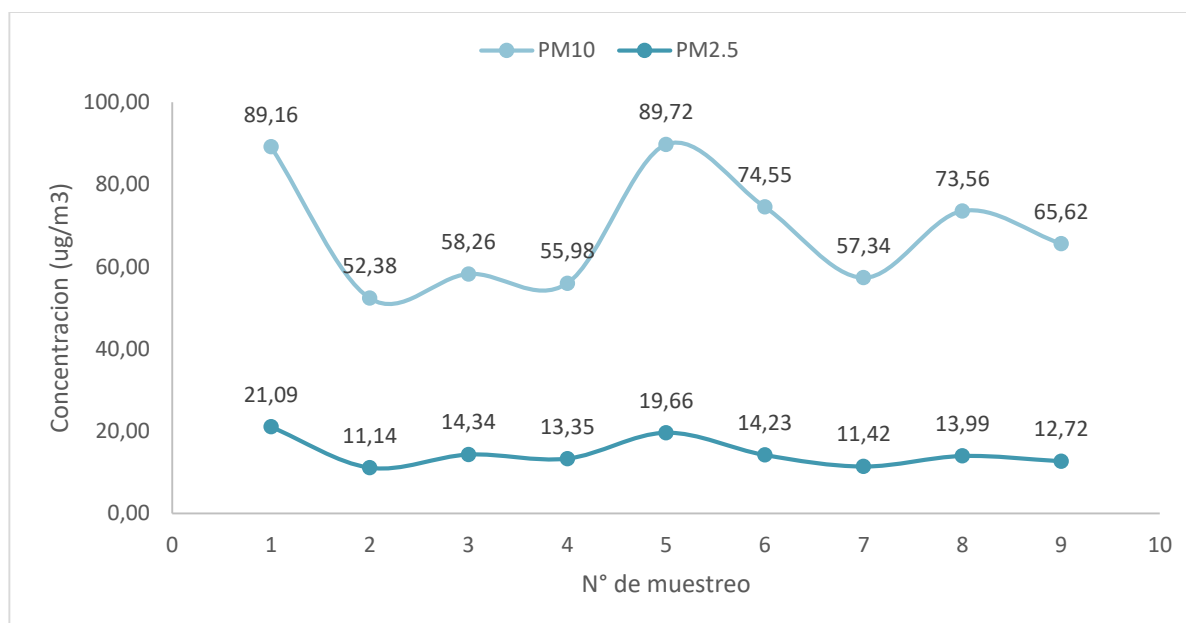
Para realizar la representación gráfica de las concentraciones medidas de PM, se ingresan los datos de concentración medidos del PM en ARCGIS especializando la información, empleando las coordenadas correspondientes a la localización geográfica de la ciudad de Barranquilla; WGS 1984. Posteriormente se exportan los valores por concentración y posición geográfica, obteniendo los valores de las concentraciones por polígono.

Cuando se presentan varios puntos de concentración en el mismo polígono se realiza un promedio de las concentraciones obteniendo así un valor promedio por polígono, y utilizando las herramientas de geoprocesamiento; *Intersect*, *Multipart*, *ArcToolBox* y *Joins* se conforman los mapas, obteniendo así mapas por tipo de contaminante donde se establecen la concentración promedio de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en las vías principales de la ciudad de Barranquilla.

## 8. Resultados y discusión

Los resultados de los muestreos móviles para el material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por campaña de monitoreo se evidencian en la Figura 15. Con un rango mínimo de  $52.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (muestreo 2) y máximo de  $89.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (muestreo 5) para  $PM_{10}$ , el  $PM_{2.5}$  registro un valor mínimo de  $11.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (muestreo 2) y máximo de  $21.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (muestreo 1).

El promedio de concentración para todas las campañas de monitoreo móvil fue de  $68.49 \pm 54.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el monitoreo del  $PM_{10}$  y se registraron datos de concentración promedio de  $16.66 \pm 4.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el monitoreo de  $PM_{2.5}$ .



**Figura 15.** Concentraciones promedio de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$

**Fuente:** Autores.

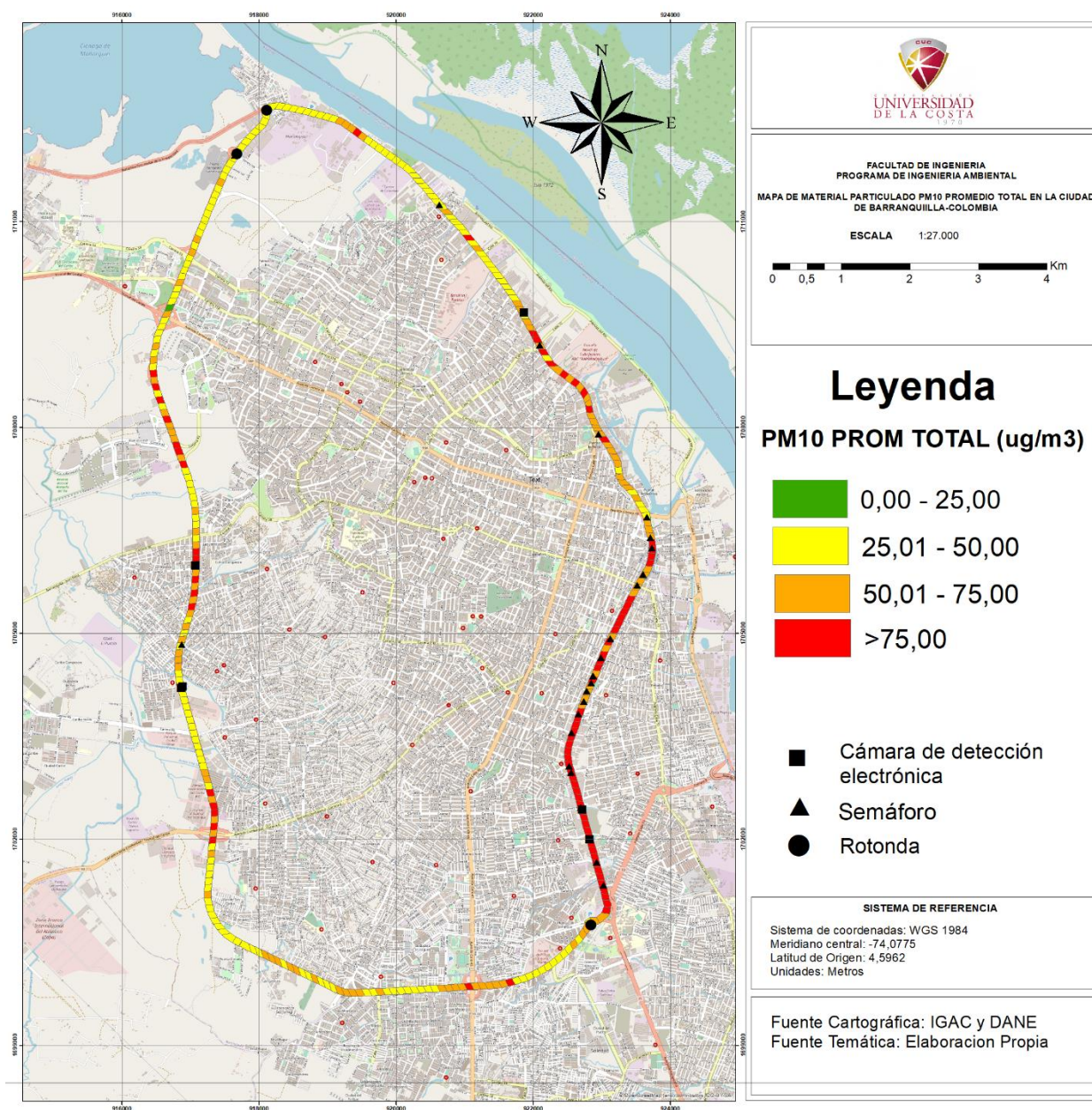
Al analizar y evaluar los resultados presentados en la Tabla 1, la mediana de los resultados de monitoreo de 10 segundos (Deshmukh et al., 2020) permite identificar los monitoreos que pudieron haber sido influenciados por otras variables. El monitoreo 1 y 5 presentaron datos de mediana elevados con valores de  $60.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (M1) y  $64.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (M5) para  $\text{PM}_{10}$  y valores de  $18.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (M1) y  $18.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (M5) para  $\text{PM}_{2.5}$  en donde el 50% de los datos obtenidos superan los valores de concentración anteriormente mencionados, por lo que las concentraciones de PM en estos monitoreos se pudieron ver influenciada por aporte de emisiones de fuentes fijas, quemas a cielo abierto, obras civiles, congestión vehicular o maquinaria pesada que operan alrededor de los centros de distribución.

**Tabla 1.** Estadística descriptiva de los monitoreos móviles de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  (concentraciones presentadas en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>M.1</b>	<b>M.2</b>	<b>M.3</b>	<b>M.4</b>	<b>M.5</b>	<b>M.6</b>	<b>M.7</b>	<b>M.8</b>	<b>M.9</b>
Promedio	89,16	52,38	58,26	55,98	89,72	74,55	57,34	73,56	65,62
Desv. Est.	101,37	61,66	70,10	67,03	84,20	90,63	72,08	86,83	86,21
Mínimo	25,67	11,61	14,63	11,64	27,51	18,07	9,95	15,06	12,22
Máximo	820,94	486,06	700,94	515,58	765,61	732,96	528,25	464,78	616,73
Mediana	60,07	32,76	37,37	34,99	64,42	46,58	34,95	42,28	35,12
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	<b>M.1</b>	<b>M.2</b>	<b>M.3</b>	<b>M.4</b>	<b>M.5</b>	<b>M.6</b>	<b>M.7</b>	<b>M.8</b>	<b>M.9</b>
Promedio	21,09	11,14	14,34	13,35	19,66	14,23	11,42	13,99	12,72
Desv. Est.	7,50	5,99	5,68	5,63	6,41	6,00	5,78	8,54	7,21
Mínimo	14,13	5,80	7,08	6,48	12,64	8,17	5,90	7,11	4,92
Máximo	61,73	50,82	46,68	42,40	58,37	52,15	40,79	58,36	47,42

Mediana	18,74	9,32	13,16	11,75	18,46	12,65	9,67	11,26	10,17
<hr/>									
Nº de									
polígonos	334								
por M. móvil									
<hr/>									

La distribución espacial promedio de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  de los 9 monitoreos móviles realizados se muestran en las Figuras 16 y 20, respectivamente. La distribución espacial por cada campaña de monitoreo se encuentra en los anexos 1-18.



**Figura 16.** Distribución espacial de las concentraciones promedio de  $PM_{10}$  para todas las campañas de monitoreo móvil.

**Fuente:** Autores

Las concentraciones de  $PM_{10}$  para todo el trayecto variaron entre  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $495 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se registraron elevadas concentraciones en algunos tramos de las vías, caracterizadas por ser de uso industrial y comercial y a su vez, influenciadas por un alto flujo vehicular.

El tramo de la vía que presenta mayor concentración promedio de  $PM_{10}$  es el tramo de la Calle 30 como se evidencia en la Figura 17, en donde se observan concentraciones que superan los  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en casi todo el tramo de la vía. Entre las carreras número 46 y 2, mismo tramo en que se posee el mayor número de semáforos (*traffic lighth*) haciendo que los vehículos se detengan y se acumulen mientras están encendidos, también se encuentran 2 cámaras de foto detección electrónica (*electronic detection camera*) que igualmente provoca que los vehículos transiten a velocidades no superiores a 30 km/h.

El tramo de la Calle 30 es uno de los más transitados y congestionados ya que en ella se encuentra la zona centro de la ciudad, este tramo de la ruta presenta gran congestión vehicular, está dentro de la zona demarcada como comercial e industrial señalada en color rojo y rosado en la Figura 4. Además, se tiene evidencia de obras civiles ejecutadas en la calle 30 durante los días de muestreo, haciendo uso de maquinaria pesada, esta es contribuyente de contaminantes atmosféricos, principalmente material particulado generado durante el desarrollo de la obra.

Un carril de la vía fue dispuesto para el tránsito de vehículos en ambos sentidos generando congestión vehicular y mayor emisiones de material particulado producto de las fuentes móviles y la resuspensión de polvo y arena como se evidencia en los anexos 22-26.

Este conjunto de factores ofrece datos de concentración superiores a  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de material particulado  $PM_{10}$  en el tramo de la calle 30.



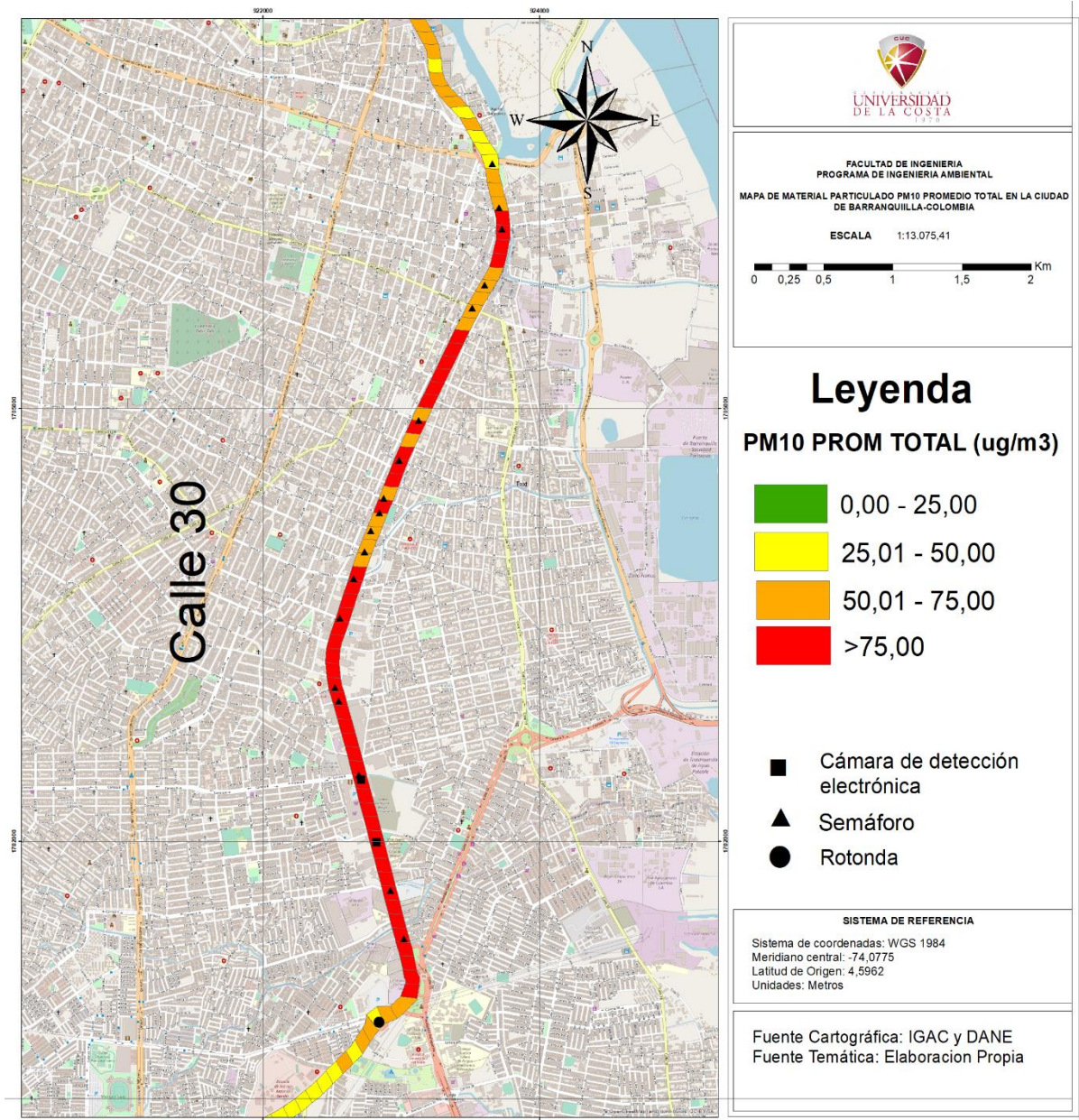


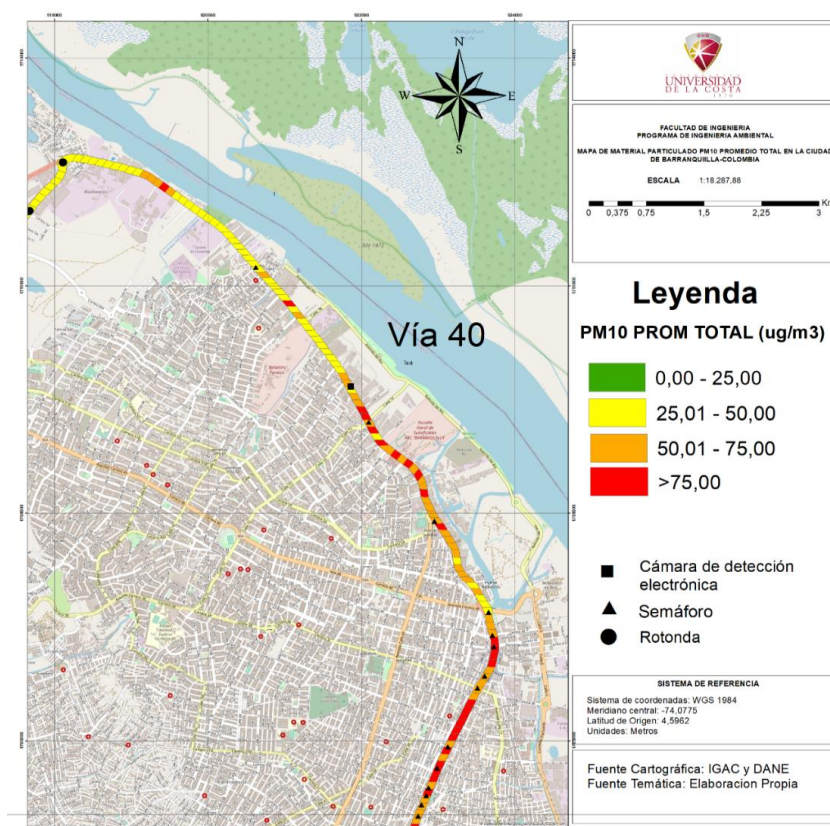
Figura 17. promedio total de PM10 tramo calle 30.

Fuente: Autores.



El tramo de la Vía 40 presenta valores de contaminación promedio elevados entre las calles número 45 y 72 zona demarcada en el POT como industrial, comercial e institucional, se tiene evidencia de varios establecimientos de comercio y empresas por lo que muchos vehículos transitan este tramo, cuenta con 2 semáforo y una cámara de foto detección lo que genera que los vehículos se detengan o transiten a velocidades inferiores a 40km/h.

Los polígonos color rojo que se evidencian entre las calles número 45 y 72 pueden deberse a la congestión vehicular como resultado del tránsito a velocidades bajas que promueven el aumento en las concentraciones de material particulado en este sector.



**Figura 18.** Promedio total PM<sub>10</sub> tramo vía 40.

**Fuente:** Autores.

En la Avenida Circunvalar se tienen evidencia de varios sectores con concentraciones elevadas de  $PM_{10}$  como se evidencia en la figura 19. Entre la Cra 6e y la Cra 9d al suroccidente de la ciudad se presentan puntos con altas concentraciones esto puede deberse al mal estado de un tramo de esa vía como se evidencia en el anexo 33, lo que provoca que el polvo y la tierra se resuspenda con el tránsito de los vehículos aumentando así las concentraciones de  $PM_{10}$ . Según los estudios de la composición química del PM, las fracciones que más aportan al material particulado son la geológica, asociada a polvo fugitivo y resuspendido (Pinto & Méndez, 2016; Vargas, 2010).

Las altas concentraciones pueden deberse también a la cercanía al puente que conecta la Calle 30 con la Avenida Circunvalar, zona con alta congestión vehicular, a su vez la cercanía al Parque Internacional del Caribe, una Estación de Servicio (EDS), la empresa Equinorte de vehículos pesados y el Parque industrial Zona Express y Caribe Verde, esta zona tiene entrada y salida constante de maquinaria y vehículos de carga pesada que contribuyen al aumento de las concentraciones de  $PM_{10}$ . Esta área esta demarcada en el POT como suelo industrial y comercial.

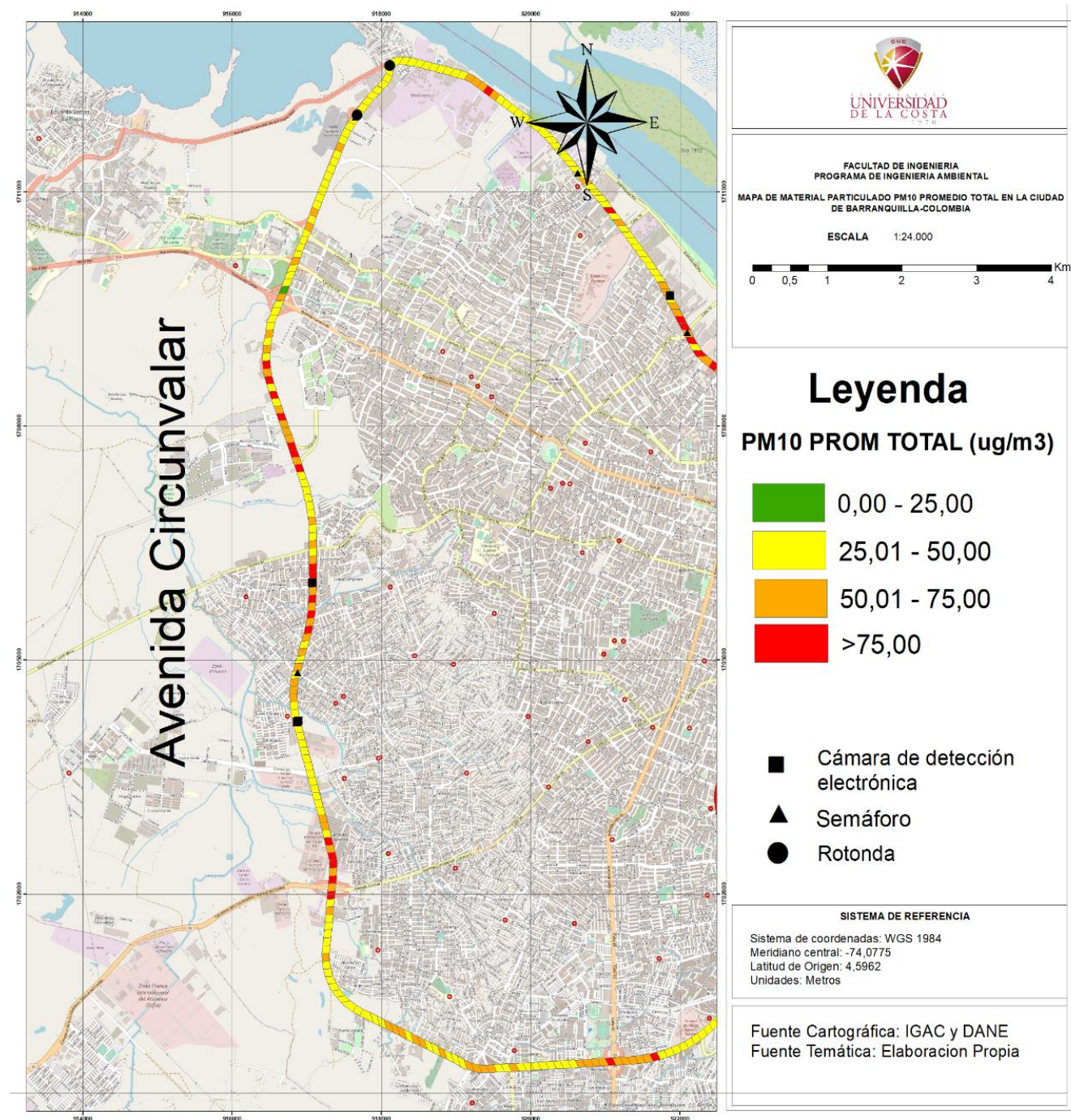
Entre las carreras número 13 y 38 aledañas a los barrios Los Olivos, Villas De Colinas y Las Estrellas de la Avenida Circunvalar, se evidencian concentraciones elevadas de  $PM_{10}$ . Esto puede deberse a la cercanía que tiene con el Parque Industrial La Trinidad, varias estaciones de servicio y zonas comerciales de carga y descarga de productos, estas promueven el tránsito de vehículos de todo tipo que colaboran a la generación de  $PM_{10}$ , además, el tramo cuenta con una cámara de foto detección haciendo que los vehículos transiten a bajas velocidades generando mayor emisión de contaminantes atmosféricos.

En este sector se tiene evidencia de obras civiles para la construcción y mejoramiento de vías durante los días de muestreo como se evidencia en los anexos 29-32, haciendo uso de maquinaria pesada y vehículos de carga pesada. Un carril de la Avenida Circunvalar fue dispuesto para el tránsito de vehículos en ambos sentidos generando congestión vehicular.

Las elevadas concentraciones en este sector de la vía pueden estar influenciadas por el aporte que generan las máquinas pesadas y los vehículos de carga pesada que trabajan en la obra civil

Entre las carreras número 43 y 46 zona norte de la Avenida Circunvalar se evidencia puntos con concentraciones elevadas, probablemente por la construcción de la Cra 43, obra civil a tener en cuenta por la utilización de vehículos de carga pesada que transitaban por este sector como se evidencia en los anexos 27-28. Este tipo de vehículos generan un aporte significativo a las concentraciones de material particulado.

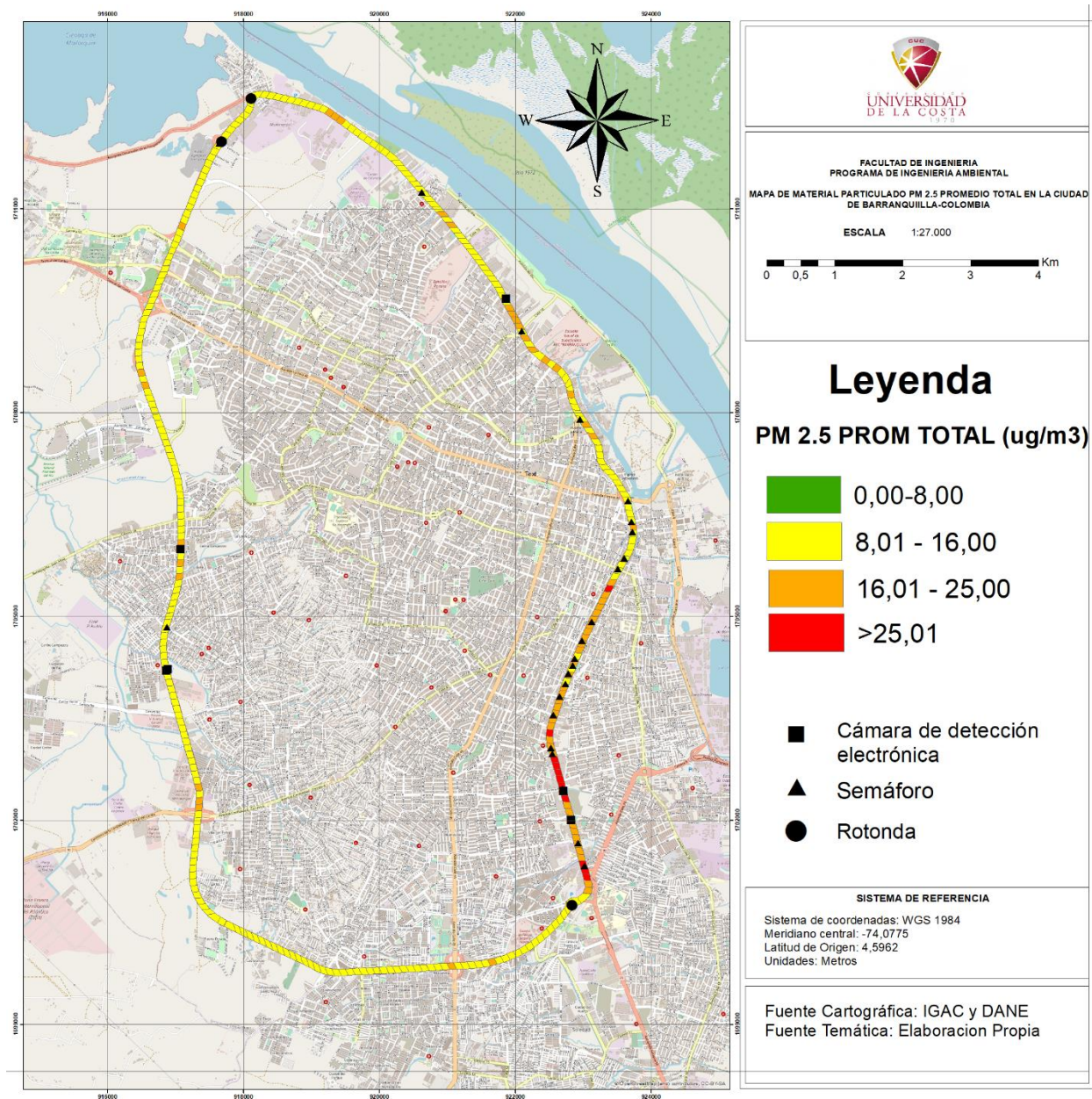
El tramo de la Avenida Circunvalar tiene alto tráfico vehicular, puesto que comunica con arterias importantes para la movilidad como lo es la carrera número 46, 51b y la Vía Cartagena – Barranquilla por lo que es muy transitada, esta zona esta demarcada en el plan de ordenamiento territorial como sector comercial. Se evidenciaron tramos con concentraciones medias de entre  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre la carrera número 46 y el *round point* de la Vía 40, con polígonos consecutivos color amarillo.



**Figura 19.** Promedio total de PM<sub>10</sub> tramo Avenida Circunvalar.

**Fuente:** Autores.





**Figura 20.** Distribución espacial de las concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  para todas las campañas de monitoreo móvil.

**Fuente:** Autores.

La distribución espacial de las concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  medidas en los 9 monitoreos se pueden observar en la Figura 20. Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  para todo el trayecto variaron entre  $5,80 \mu g/m^3$  y  $61,73 \mu g/m^3$ .

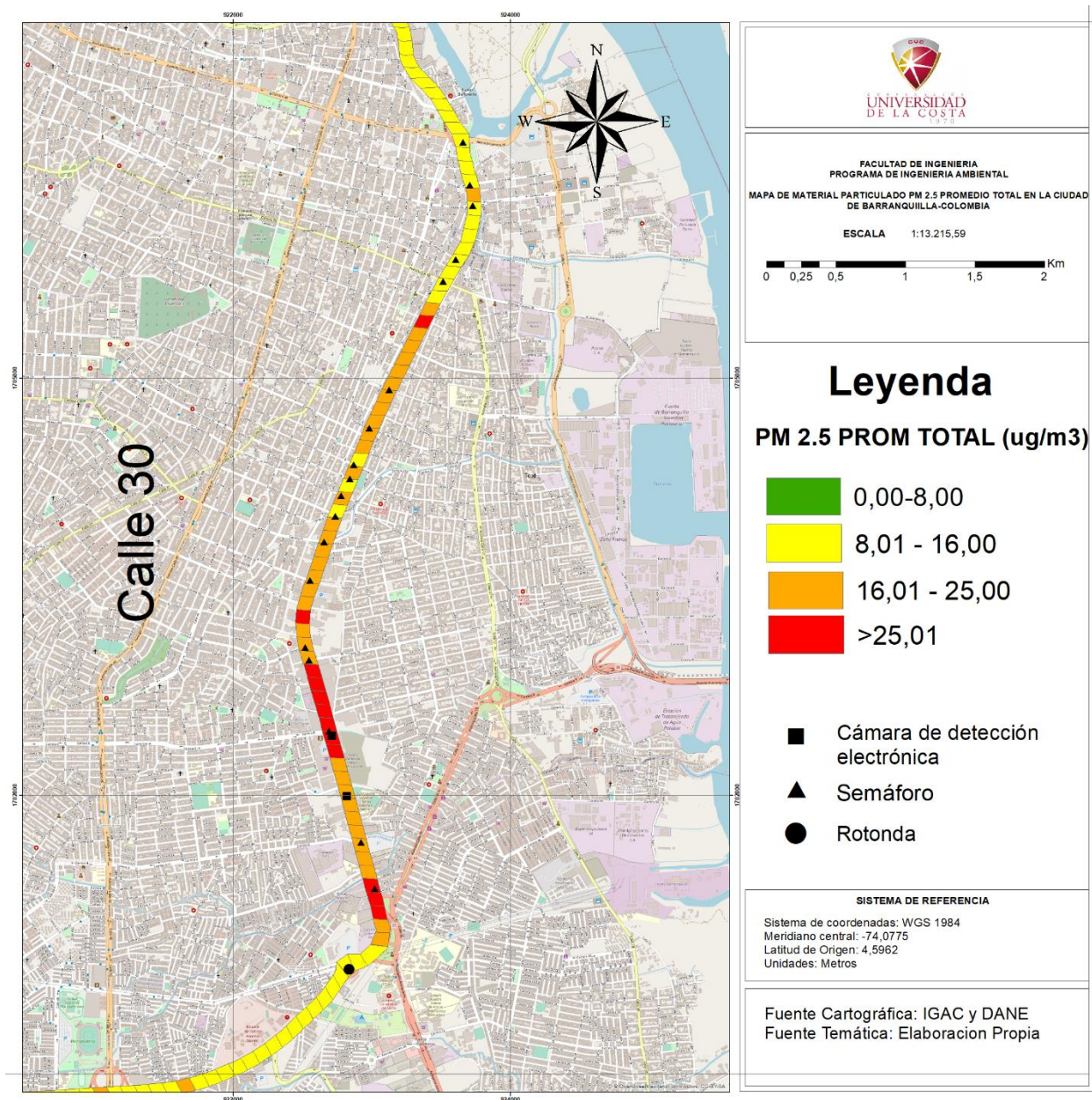
En la figura 21 se evidencian elevadas concentraciones de material particulado en el tramo que comprende la Calle 30 entre las carreras número 46 y 2, en donde se muestran tonalidades de color marrón y rojo denominado a concentraciones superiores a  $16 \mu g/m^3$  y  $25 \mu g/m^3$  mismo tramo en el que se encuentran la mayoría de las semaforizaciones en la ruta estudiada, así como cámaras de foto detección, que genera que los vehículos se detengan o disminuyan la velocidad, presentándose cambios en los patrones de conducción como la aceleración, desaceleración y patrones de cruces dando como resultado una combustión incompleta dentro del motor, lo que conduce a una mayor liberación de PM del tubo de escape (Gokhale & Raokhande, 2008). Así mismo, se observaron variaciones periódicas en la contaminación por partículas que se correlacionan con los cambios en las señales de tránsito en las intersecciones de tránsito urbano. (Hong-di & Wei-Zhen, 2012).

En la Calle 30 se encuentra ubicado la zona centro de la ciudad de Barranquilla, donde se ubican establecimientos de comercio, rutas de buses, peatones, vehículos particulares, de carga, vehículos informales y demás actores viales que en conjunto con la congestión vehicular crean un escenario de contaminación del aire.

El sector más crítico se evidencia entre la carrera 15 y 6B con concentraciones superiores a  $25 \mu g/m^3$  mismo sector donde se encuentra dispuesto un semáforo y una cámara de foto detección, además, se tiene evidencia de obras civiles ejecutadas en este tramo, haciendo uso de maquinaria pesada y agravando aún más la problemática de congestión vehicular ya que imposibilita el



distanciamiento entre vehículos, y la dispersión de los contaminantes como se evidencia en los anexos 23-24



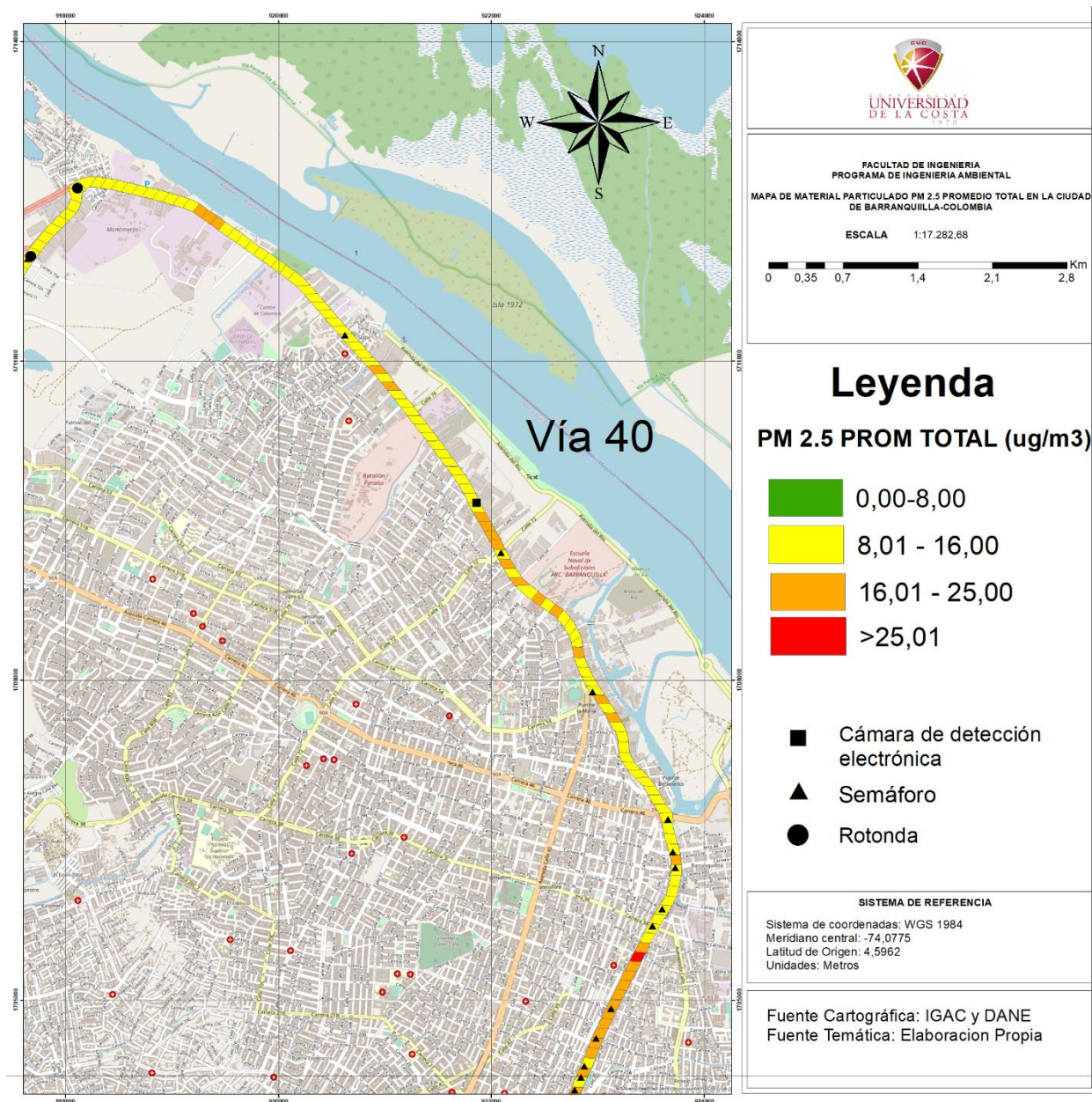
**Figura 21.** Promedio total de PM2.5 tramo calle 30.

**Fuente:** Autores.

En el tramo Vía 40 se obtuvieron valores de concentración entre  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $25\mu\text{g}/\text{m}^3$  que se relacionan con la cercanía al semáforo y la cámara de foto detección electrónica, que induce a los vehículos a detenerse o transitar a velocidades bajas entre las calles número 45 y 72, estas concentraciones son producto de la congestión vehicular como consecuencia del tránsito a velocidades bajas que promueven el aumento en las concentraciones de material particulado.

El tramo de la vía 40 posee valores medios con código de color amarillo y marrón con se evidencia en la Fig. 22, a pesar de ser una vía de tránsito rápido se evidencia concentraciones medias esto se puede deberse también al uso del suelo; esta zona esta demarcada como suelo industrial donde se tiene un flujo de vehículos considerable, también transitan vehículos de carga y ruta de buses públicos.





**Figura 22.** Promedio total de PM2.5 tramo de la Vía 40.

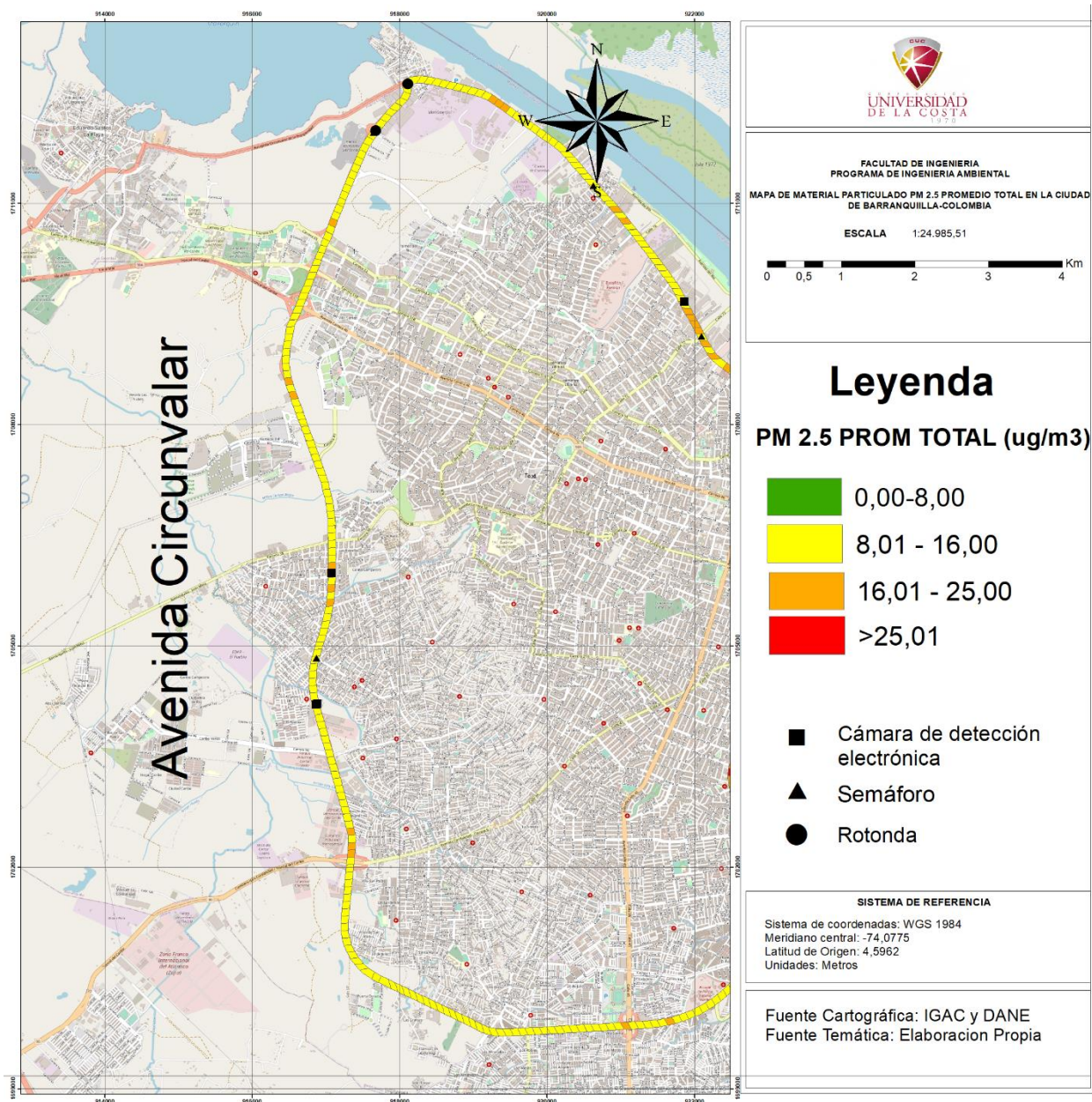
**Fuente:** Autores

En el tramo Avenida Circunvalar evidenciado en la figura 23 en su mayoría se obtuvieron valores de concentración entre  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Entre las carreras número 27 y 36 aledañas a los barrios La Pradera, Villas De Colinas y Las Estrellas de la Avenida Circunvalar, se evidencian concentraciones entre  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$ . Esto puede deberse a la cercanía que tiene una cámara de foto detección haciendo que los vehículos transiten a bajas velocidades generando mayor emisión de contaminantes atmosféricos.

En este sector se tiene evidencia de obras civiles en la vía durante los días de muestreo como se evidencia en los anexos 29-32, las elevadas concentraciones en este sector de la vía pueden estar influenciadas por el aporte que generan las máquinas pesadas y los vehículos de carga pesada que trabajan en la obra civil





**Figura 23.** Promedio total de PM<sub>2.5</sub> tramo Avenida Circunvalar.

**Fuente:** Autores.

La variabilidad espacial de las concentraciones de material particulado en las áreas urbanas está relacionada con distintas variables como los son; la ubicación de las fuentes de emisión, la clasificación y uso del suelo, el estado de la vía y la cercanía de las fuentes de emisión, evidenciando zonas con elevadas concentraciones de PM en sitios cercanos a semáforos, intersecciones de tráfico vehicular o áreas señalizadas para el cruce de peatones, áreas que generan congestión vehicular acompañado con el efecto de *stop and go* de los vehículos que resultan en niveles más altos de combustión incompleta y mayores emisiones de polvo de frenos.(Crésó et al., 2021; Blanco, 2019; Ham, Vijayan, Schulte, & D.Herner, 2017; Goel & Kumar, 2014).

Los puntos donde se encontró mayor número de polígonos con elevadas concentraciones de material particulado fue la zona sur de la ciudad, vías que presentan mayor número de intersecciones, semáforos, cámaras de foto detección y tramos de vías con velocidades de flujo no superiores a 30 km/h, velocidades bajas que promueven el aumento en las concentraciones de material particulado producto de la congestión vehicular. Contrario a la zona norte de la ciudad cuya velocidad máxima permitida en algunos tramos es de entre 60 km/h y 80 km/h, vías identificadas como vías de rápido flujo o circulación rápida y se evidencian menor número de semáforos, lo que facilita el distanciamiento entre vehículos, y la dispersión de los contaminantes. Es en estas velocidades en donde se genera el menor consumo de combustible por lo que se genera menor combustión y emisión de material particulado a la atmosfera (Blanco, Evaluacion de la variabilidad espacial de black carbon, 2019).

Las concentraciones registradas de hasta 700,00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$  y 61,73  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{2.5}$  pueden ser inhaladas por ciclistas, guardias de tránsito, peatones o transeúntes que trabajan, o se movilizan por esta misma red de carreteras teniendo en cuenta que las concentraciones de PM son determinadas a la altura respiratoria.

La concentración de PM a la altura aproximada de 1.6 m en semáforos, zonas de cruce y espacios cercanos a vías es considerable, por la cercanía a los tubos de escape de los vehículos, que es la principal fuente de contaminación del tráfico. La turbulencia inducida por vehículos y peatones junto con la dirección del viento ambiental y muchos otros factores plantearon una influencia significativa en la propagación vertical de los gases de escape en el microambiente del tráfico (Carpentieri, Kumar , & Robinsb, 2012). La turbulencia inducida por el vehículo puede ayudar en gran medida a la difusión de contaminantes en las áreas más bajas de una intersección urbana, especialmente en condiciones de viento tranquilo (Wang, Zhong, He, Ren, & Cai, 2018; Zhang, Gu, & Yu, 2017).

Los peatones no solo esperan para cruzar al costado de la carretera, sino que también pasan el cruce de peatones en una intersección, lo que resulta en la exposición de los peatones a elevadas concentraciones de material particulado (Wang, diHe, Zhao, & Peng, 2021). Los resultados recopilados por el contador de partículas HPC601 podrían ser usados para evaluar la exposición de las comunidades a las concentraciones del contaminante.

En el país, se promueven los viajes activos (es decir, caminar y andar en bicicleta) con el fin de reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire. Esto se ha considerado un paso prometedor hacia el logro de los objetivos de desarrollo sostenible, pero resulta problemático ya que el viajero activo puede estar sometido a elevados niveles de concentración de material particulado como los registrados en el tramo de la Calle 30 con concentraciones de  $\text{PM}_{10}$

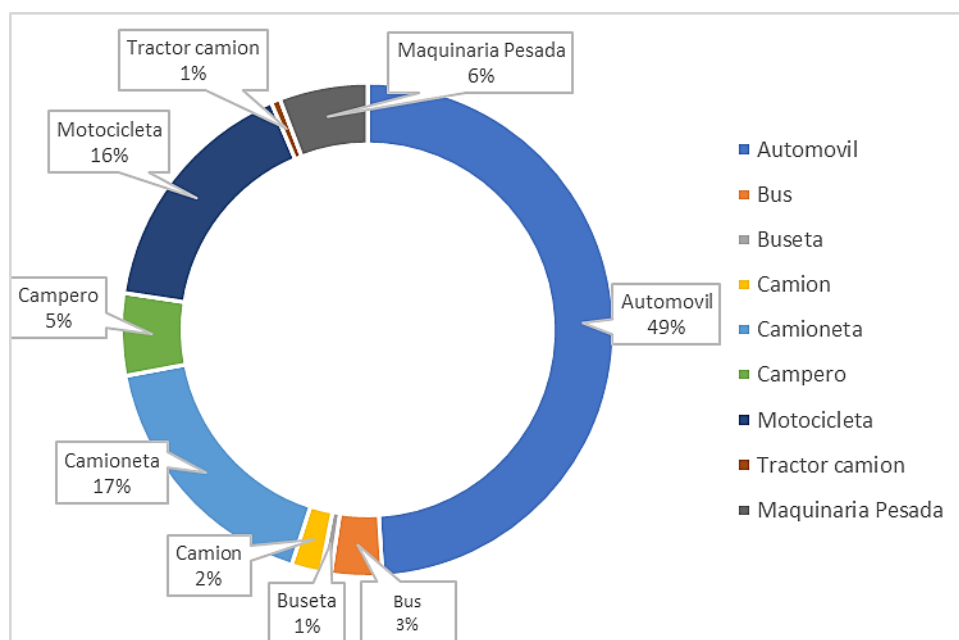
superiores a  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y superiores a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{2.5}$ , contaminación a la que se expone al caminar o andar en bicicleta cerca de las carreteras (Wu et al., 2020).

Las áreas constituidas por zonas mixtas (zonas residencial, industrial y comercial) muestran concentraciones heterogéneas, es posible que las mediciones muy altas sean el resultado del aporte en conjunto de fuentes locales o fijas. Sin embargo, dado que todo el muestreo se realizó en vías públicas, y el material particulado es medido muy cerca a la fuente, algunas mediciones altas pudieron ocurrir cuando el vehículo de muestreo móvil se encontraba directamente detrás de un vehículo en movimiento o en ralentí mientras conducía por la ruta. También se pudo tener influencia de vehículos livianos en mal estado como (automóviles y motos) o vehículos pesados conduciendo delante del vehículo de monitoreo móvil. Los principales contribuyentes de material particulado son los vehículos pesados (Conde Riaño, 2021; Taheri, 2019).

Se debe revisar con las autoridades de tránsito si los vehículos en su mayoría cumplen con la revisión técnico-mecánica, requisito exigido para verificar que las emisiones generadas por el vehículo se encuentren dentro de la norma a fin de reducir la contaminación ambiental y evaluar el estado del motor y su funcionamiento, el sistema de frenos, llantas, entre otros elementos del vehículo que pueden emitir PM (Alfonso Corredor, 2018).

Las zonas industriales y comerciales donde se presenta un alto flujo vehicular generalmente favorecen a un alto nivel de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  (Toro, Ramírez, Quiceno, & Zuluaga, 2001). Mientras que, en zonas residenciales se obtienen un bajo nivel de concentración de los contaminantes debido al bajo flujo vehicular. Las zonas demarcadas como comercial e industrial se relacionan con concentraciones elevadas de material particulado. (Vienneau et al., 2013).

La ciudad de Barranquilla en el 2019 presentaba un parque automotor de 195.664 vehículos donde, 49% son automóviles, 17% camionetas, 16 % motocicletas, 6% maquinaria pesada, 5% camperos, 3% buses, 2% camiones, 1% busetas y 1% tractor camiones como se puede observar en la Figura 24. Es importante destacar que el parque automotor de la ciudad presentó un aumento de 3,15% para el año 2020, el cual puede llegar a generar un escenario de congestión vehicular aún más significativo, particularmente en cruces estratégicos para la movilidad lo que conlleva a un incremento en los niveles de contaminación atmosférica.



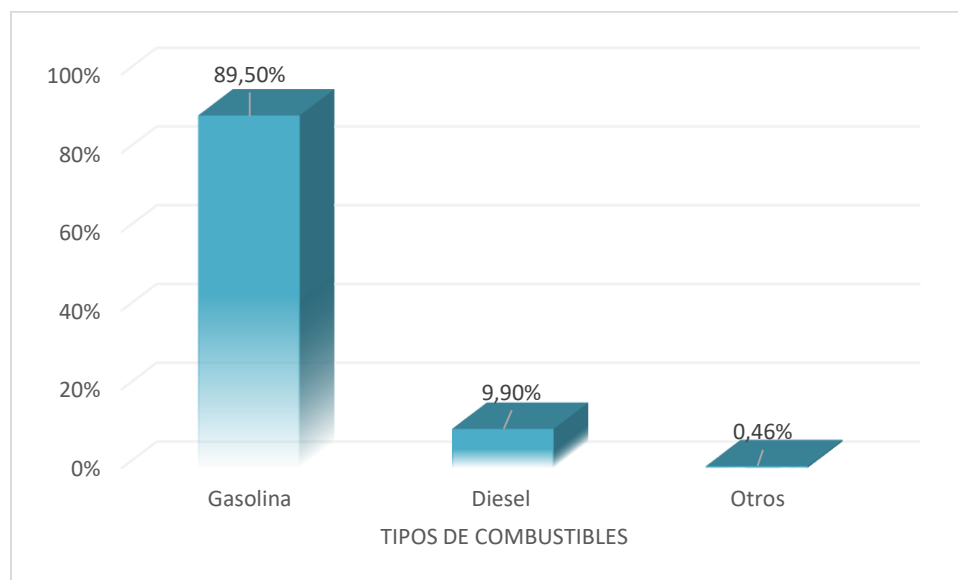
**Figura 24.** Porcentaje de los tipos de vehículos del parque automotor en el 2019

**Fuente:** Autores

El incremento en las concentraciones de PM no solo es generado por las emisiones de tubo de escape de los vehículos sino también por el desgaste de los frenos, los neumáticos y de la superficie de la carretera (Harrison, et al., 2021; Kukutschová & Filip, 2018). La contribución

del desgaste de los frenos a la emisión total de PM del tráfico varía entre un 11% y un 21% (Lawrence et al., 2013) (Singh, Biswal, Kesarkar, Mor, & Ravindra, 2020).

Las emisiones que no son de tubo de escape son partículas que surgen de la abrasión de los frenos, neumáticos y el desgaste de la superficie de la carretera, estas aumentan las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (EMEP, 2021; Harrison, et al., 2021). Otro factor que influye en las emisiones de PM es el tipo de combustible. En la ciudad de Barranquilla, para el 2019 su parque automotor estaba conformado por un 9,9% de vehículos alimentados con diésel, un 89,5% con gasolina y un 0,4% con otros tipos de combustibles como se puede evidenciar en la Figura 25, siendo la gasolina el combustible más utilizado por los automóviles, camionetas, camperos y motocicletas. Por otro lado, los vehículos de transporte público como los buses, busetas, microbuses y buses articulado utilizan combustible diésel. Sin embargo, aunque estos representan un pequeño porcentaje de la flota vehicular, generan una significativa contribución a las concentraciones de  $PM_{2.5}$  (Rojas, 2004).



**Figura 25.** Porcentaje de vehículos por tipos de combustible

**Fuente:** Autores.



Los autobuses más antiguos y los camiones de carga pesada en la ciudad de Barranquilla pueden ser los principales generadores de los altos niveles de contaminación de PM. Cierta parte de la flota del transporte público hacen un aporte significativo, dado el hecho de que la mayoría de estos buses utiliza la tecnología antigua de motores a diésel (Créso et al., 2016).

En las vías estudiadas circulan vehículos de carga pesada. Esta tipología de vehículos tiene una contribución importante a las emisiones de material particulado, puesto que emiten 4 veces más emisiones de PM que los vehículos convencionales. (Zawacki, Baker, Phillips, Davidson, & Wolfe, 2018; Rojas, 2004)

Un estudio realizado en Bogotá, evidencio que aproximadamente el 95% de vehículos particulares son a gasolina y el 5% constituyen a vehículos que utiliza diésel. Demostraron que los buses de transporte público y carga pesada son los mayores promotores de las altas concentraciones del material particulado (Ramirez, 2018).

Otro factor que posiblemente influyo de manera significativa en las altas concentraciones de PM<sub>10</sub> fueron las obras civiles en ejecución a lo largo de la vía ya que estas generan material particulado, por el cargue y descargue de los materiales usados, la resuspensión de partículas de polvo sedimentadas, el uso de maquinaria pesada, entre otras.

A pesar de que en la ciudad existe gran cantidad de vehículos, algunas vías se encuentren en mal estado, la ausencia de un Sistema Integrado de Transporte masivo interconectado y con tecnologías limpias, han llevado a que los ciudadanos sigan adquiriendo vehículos para movilizarse. Esto se encuentra directamente relacionado a mayores emisiones de PM (Alfonso Corredor, 2018).

Se deben tomar medidas para mejorar el tráfico en la ciudad pues el estudio halló que el  $PM_{10}$  surge de situaciones vinculadas con la congestión vehicular como el desgaste mecánico de piezas de los vehículos como los frenos y los neumáticos, así como las emisiones de tubos de escape. Investigaciones realizadas en la ciudad de Medellín evidencian PM de origen geológico atribuidos a vías en mal estado que aportan gran cantidad de  $PM_{10}$ , producto de la resuspensión provocada por el flujo vehicular, que a su vez remueve material simplemente por circulación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

Analizando el caso de estudio en Bogotá donde se evalúa el material particulado resuspendido, es pertinente mencionar que en los inventarios de emisiones de material particulado realizados para vías pavimentadas, obtienen que más del 50% de las emisiones totales están asociadas a resuspensión, para el caso de  $PM_{10}$  su origen predominante es la abrasión de superficies y en el caso de las partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) su origen predominante es desgaste de neumáticos y frenos y en un pequeño porcentaje (12%) el origen es asociado al desgaste del suelo o abrasión de superficies (Pinto & Méndez, 2016; Beltrán, 2012).

Como agente contribuyente al  $PM_{2.5}$ , cerca del 50%, proviene de partículas de combustión generadas por vehículos y un 25% proviene de polvo resuspendido en vías sin pavimentar; por lo tanto, el tráfico vehicular es responsable de la mayor contribución, ya sea de polvo en resuspensión (la principal fuente de  $PM_{10}$ ) o de partículas de combustión (las principales contribuyentes al  $PM_{2.5}$ ) (Pinto & Méndez, 2016; O’Ryan & Larraguibel, 2000).

Al comparar en la Tabla 2 los resultados obtenidos con la ciudad de Bogotá, cuyos resultados de concentración fueron asociados a la interacción entre las fuentes móviles y fijas; el transporte público y privado de pasajeros y de carga cercano, la repercusión de polvo y la congestión vehicular. Así mismo se evidencia altas concentraciones de PM en Vellore,

Guangzhou y Beijing, debido al alto tráfico vehicular e intercesiones adicionalmente, se resalta las diferencias del área de estudio y las condiciones climáticas.

**Tabla 2.** Comparación de concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en áreas urbanas obtenidos por monitoreos móviles de diferentes estudios

PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Localización	Sitio	Referencia
54,28 ± 68,49	4,19 ± 16,66	Barranquilla, Colombia	Urbano	Este estudio
30,4 ± 69,7	30,0 ± 55,1	Braddock, EE. UU.	Urbano	(Tunno, et al., 2012)
----	55,21 ± 95,89	Vellore, India	Urbano	(Manojkumar & Srimuruganandam, 2021)
50 ± 160	---	Bogotá, Colombia	Urbano	(Garcia Hernandez, 2018)

39,7 ± 76,5	23,5 ± 50,2	Guangzhou, China	Urbano	(Li, et al., 2021)
45 ± 124	26,0 ± 89,5	Beijing, China	Urbano	(Li, et al., 2021)

## 9. Conclusión

Las concentraciones de material particulado atmosférico obtenidas a partir de los muestreos móviles urbanos utilizando el contador de partículas HPC601 muestran la variación temporal y la variabilidad espacial del  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en las principales vías de la ciudad de Barranquilla. De esta manera queda más fácil comprender las fuentes de emisión, y se obtiene una visión general del comportamiento del PM. Las concentraciones promedio durante el período evaluado fueron de  $68,49 \pm 54,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el  $PM_{10}$  y de  $16,66 \pm 4,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el  $PM_{2.5}$ .

Los puntos con elevadas concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se registraron próximas a la zona centro de la ciudad producto de las diferentes infraestructuras viales y de transporte. Este tramo de la ruta está dentro de la zona demarcada como comercial e industrial, y corresponde a una región donde la circulación de los vehículos no supera velocidades de 30 km/h. Contrario a la zona norte de la ciudad donde los vehículos transitan a velocidad de entre 60 y 80 km/h, vías de rápido flujo, que facilitan el distanciamiento entre vehículos, y la dispersión de los contaminantes.

El material particulado tiende a concentrarse en los tramos de carreteras con mucho tráfico en las proximidades a fuentes probables, como intersecciones, cruce de peatones, vías con baja velocidad y sectores de congestión vehicular. Es probable que los trabajadores urbanos al aire libre, como la policía de tránsito, los guardias de estacionamiento, los barrenderos o los vendedores ambulantes, se expongan a elevadas concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

Conforme a lo descrito en los resultados, las concentraciones fueron producto de las emisiones originadas principalmente a partir de las fuentes móviles. En relación con lo expuesto en esta investigación se logra evidenciar que la distribución espacial de las concentraciones de  $PM_{10}$  y

PM<sub>2.5</sub> varían según la densidad vehicular, presentado altas concentraciones causados por patrones de conducción de vehículo (*stop and go*) y congestión vehicular.

Se demostró que la metodología de monitoreo móvil es adecuada para capturar gradientes espaciales de contaminación del aire, para determinar los puntos calientes de emisión y los eventos de emisión singulares que afectan la calidad del aire de forma directa.

Esta tesis demuestra que se pueden obtener conocimientos sobre la naturaleza espacial y temporal de las concentraciones del material particulado y su impacto en el entorno urbano a través de monitores móviles. La recopilación de datos es esencial para proteger la salud pública. Este estudio destaca el potencial de aplicar el monitoreo móvil para mapear los niveles de contaminación del aire en áreas urbanas. Estos resultados contribuirán a identificar puntos críticos para el mejoramiento de la movilidad, ayudando a minimizar problemáticas asociadas a la salud de la población y los efectos al ambiente.

Esta investigación proporciona uno de los primeros estudios que utilizan el monitoreo móvil en la región Caribe para evidenciar los puntos donde se presenta mayor y menor concentración de material particulado así como la posible exposición a la que se encuentra la población, información que puede ser utilizada como herramienta de la política pública ambiental, colaborando a la construcción de indicadores ambientales para mitigar los problemas asociados la contaminación del aire e implementar estrategias de control de la contaminación. En este sentido, se podrían adoptar medidas de gestión ambiental para minimizar los efectos negativos y garantizar el cumplimiento de las normas sobre calidad ambiental.

## 10. Recomendaciones

De acuerdo con los resultados y observaciones encontrados en el desarrollo de esta investigación se ofrecen las recomendaciones relevantes para un adecuado análisis y muestreo en futuras investigaciones con temas relacionados con monitoreo móvil y contaminación del aire.

Se recomienda un experimento futuro que valide estos resultados, colocando el contador de partículas con al menos un instrumento de alta calidad para calibrar y/o validar las mediciones del contador de partículas HPC601.

Se sugiere registrar cuando el vehículo está detenido en ralentí, para caracterizar mejor los puntos de congestión vehicular y evaluar el posible porcentaje de auto emisión de material particulado. Además, proponemos el desarrollo de un protocolo estándar que pueda ser utilizado para diferentes estudios de monitoreo móvil.

Para estudiar la variabilidad temporal, así como las propiedades del material particulado se recomienda periodos de muestreos mucho más extensos, con más frecuencia entre muestreos junto con la comprensión de los cambios temporales en las concentraciones de los contaminantes, esto permitirá conocer mejor los procesos de formación y dispersión.

Se recomienda medir las concentraciones de PM por tramos de las vías, para así identificar las características propias de cada tramo por separado, compararlos entre sí y realizar un análisis más objetivo.

Se sugieren tomar medidas para mejorar el tráfico en la ciudad pues el estudio halló que el  $PM_{10}$  surge de situaciones vinculadas con la congestión vehicular como el desgaste mecánico de piezas de los vehículos, así como las emisiones de tubos de escape.

En futuras investigaciones se recomienda usar vehículos con rutas definidas como los autobuses puesto que tienen la ventaja de atravesar los mismos tramos de calle varias veces al día, haciendo que el estudio sea mucho más económico. mientras que, con vehículos no programados, como los vehículos particulares, podemos utilizar tramos relativamente pequeños teniendo en cuenta los costes de operación y logística.

Los análisis futuros se centrarán en evaluar factores estacionales y otros factores temporales que afectan las concentraciones de material particulado en el área de estudio, y comparaciones de mediciones de sitios móviles y fijos para evaluar la variabilidad temporal y espacial de las concentraciones de material particulado producto de las fuentes móviles en este complejo entorno urbano.

Los resultados recopilados por el contador de partículas HPC601 podrían ser usados para evaluar la exposición de las comunidades a las concentraciones del contaminante. Al aplicar un sistema de monitoreo móvil a una altura respiratoria, los niveles de contaminación del aire estudiados podrían ser usado para evaluar la exposición de los peatones y ciclistas que comparten la misma red de carreteras. Además, la recopilación de datos podría capturar las variaciones temporales y espaciales del material particulado, lo cual es significativo para estimar el nivel de exposición humana al considerar la heterogeneidad de las concentraciones medidas.

Se deben desarrollar estudios sobre el análisis de partículas ultrafinas, que están relacionadas con ingresos hospitalarios y efectos nocivos a la salud que dan lugar a un aumento de la morbimortalidad. Estudios epidemiológicos respaldan la existencia de una asociación entre la exposición a la contaminación atmosférica a las enfermedades cardiovasculares, lo que ha llevado a proponer que constituya un nuevo factor de riesgo cardiovascular «modificable», de



gran importancia. Aunque la contaminación atmosférica está formada por una mezcla compleja de compuestos en fase gaseosa y particulada, es mayor la evidencia que involucra a los componentes del material particulado (PM) ultrafino como causa de la parte principal de los efectos cardiovasculares. (Araujo, 2011; Linares & Díaz , 2009)

## 11. Referencias

- Deshmukh, P., Kimbrough, S., Krabbe, S., Logan, R., Isakov, V., & Baldauf, R. (2020, May 1). Identifying air pollution source impacts in urban communities using mobile monitoring. *Science of The Total Environment*, 715. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136979>
- Benavides Nieves, M. F., & Mojica Godoy, V. (15 de Octubre de 2019). Analisis de la Influencia de los de techos verdes . *Universidad del Bosque*. Obtenido de [https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2125/Benavides\\_Nieves\\_Mar%C3%ADa\\_Fernanda\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2125/Benavides_Nieves_Mar%C3%ADa_Fernanda_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fachingera, F., Drewnicka, F., & Borrmann, S. (15 de Octubre de 2021). How villages contribute to their local air quality – The influence of traffic- and biomass combustion-related emissions assessed by mobile mappings of PM and its components. *Atmospheric Environment*, 263. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118648>
- ACNUSA. (2018). *Efectos de la contaminación atmosférica*. Obtenido de <https://www.acnusa.fr/fr/la-pollution-de-lair/les-effets-de-la-pollution-atmospherique/19>
- Adams, M., & Kanaroglou, P. (2016). Mapping real-time air pollution health risk for environmental management: Combining mobile and stationary air pollution monitoring with neural network models. *Journal of environmental management*, 168, 133-141. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.012>
- Aguilera, M. (19 de 03 de 2013). *Composición de la economía de la región Caribe de Colombia*. Obtenido de Banco de la Republica: [https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/eser\\_53\\_caribe\\_2013.pdf](https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/eser_53_caribe_2013.pdf)
- Aguirre, A. (2010). *Estudio de series temporales y composición química del material particulado atmosférico en distintas áreas del País Vasco*. Euskadi: Universidad del país Vasco.
- Alcaldía de Barranquilla. (2018). Usos de suelo. *Alcaldía de Barranquilla*.

- Alcaldia de Barranquilla. *Conoce Barranquilla*. Obtenido de <https://www.barranquilla.gov.co/descubre/conoce-a-barranquilla/presentacion>
- Alcaldia de Barranquilla. (Mayo de 2020). *Informe general oficina de registro de transito*. Obtenido de [file:///C:/Users/zahory/OneDrive%20-%20Universidad%20de%20la%20Costa%20-%20CUC/Tesis%20Juan%20y%20Zahory/tramites\\_mayo\\_2020.pdf](file:///C:/Users/zahory/OneDrive%20-%20Universidad%20de%20la%20Costa%20-%20CUC/Tesis%20Juan%20y%20Zahory/tramites_mayo_2020.pdf)
- Alfonso Corredor, D. M. (2018). EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE LOS VEHÍCULOS EN BOGOTÁ ESTRATEGIAS DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA SU MITIGACIÓN. *PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA*, 111. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/38114/DOCUMENTO%20DIANA%20MELISA%20ALFONSO.pdf>
- Anenberg, S., Horowitz, L., Tong, D., & West, J. (2010). An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environ Health Perspect*, 118(9), 1189 - 1195. doi:10.1289/ehp.0901220
- Angulo, L., Huertas, J., & Restrepo, G. (2011). Caracterización de Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM 10) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto. *Información Tecnológica*, 22(4), 23-34. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000400004
- Arciniegas, C. (2011). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. *Luna Azul*, 195-213.
- Area Metropolitana de Barranquilla. (2021). *BARRANQUILLA*. Obtenido de <http://www.ambq.gov.co/barranquilla/>
- Arrieta, A. (2016). Dispersión de material particulado (pm10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 43-56.
- Baklanov, A., Molina, L., & Gauss, M. (2016). Megacities, air quality and climate. *Atmospheric Environment*, 126, 235-249. doi:https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059

- Barranquilla Verde. (2018). *Informe Anual de Calidad de Aire de Barranquilla*. Barranquilla: Laboratorio Ambiental Barranquilla Verde.
- Barraza, C., & Sanchez, L. (2019). *Evaluacion de la concentracion de material particulado PM10 en la region norte- centro historico de la ciudad de Barranquilla*. Barranquilla: Universidad de la costa.
- Beltrán, D. B. (2012). Emisiones vehiculares de material. *Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 25-32.
- Billet, S., Garçon, G., Dagher, Z., Verdin, A., Ledoux, F., Cazier, F., . . . Shirali, P. (2007). Ambient Particulate Matter (PM2.5): Physicochemical characterization and metabolic activation of the organic fraction in human lung epithelial cells. *Environmental Research*, 105(2), 212-223. doi:10.1016 / j.envres.2007.03.001
- Blanco. (2006). Caracterización microbiológica del material particulado como factor de riesgo sobre la salud en la localidad de Puente Aranda, Bogotá D.C. Colombia. *RevActaNova*, 3(2), 1683-0789. Obtenido de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892006000100009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892006000100009&script=sci_arttext)
- Blanco. (2019). *Evaluacion de la variabilidad espacial de black carbon*. Barranquilla, Colombia: Universidad de la Costa. Obtenido de [https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/6012/Evaluaci% c3% b3n% 20de% 20la% 20v ariabilidad% 20espacial% 20de% 20Black% 20Carbon% 20en% 20un% 20% c3% a1rea% 20urbana% 20del% 20Caribe% 20colombiano.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/6012/Evaluaci%c3%b3n%20de%20la%20variabilidad%20espacial%20de%20Black%20Carbon%20en%20un%20%c3%a1rea%20urbana%20del%20Caribe%20colombiano.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D., Forster, P., Berntsen, T., Deangelo, B., . . . Gu, S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11), 5380-5552. doi:<https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Bonilla, L. (2010). *El sector industrial de Barranquilla en el siglo XXI: ¿Cambian finalmente las tendencias?* Obtenido de Banco de la Republica de Colombia: <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-136.pdf>

- Borrás, E. (2013). *Caracterización del material particulado atmosférico generado en reactores fotoquímicos y procedentes de muestra ambientales*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Brokamp, C., Brandt, E., & Ryan, P. (2019). Evaluación de la exposición a la contaminación del aire exterior para estudios epidemiológicos: estrategias de muestreo personal y basadas en modelos. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2002-2006.
- Bukowiecki, N., Dommen, J., Prévot, A., Richter, R., Weingartner, E., & Baltensperger, U. (2002). A Mobile Pollutant Measurement Laboratory-measuring Gas Phase and Aerosol Ambient Concentrations with High Spatial and Temporal Resolution. *Atmosphere Environment*, 32, 5569-5579. doi:[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00694-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00694-5)
- Cakmak, S., Hebborn, C., Pinault, L., Lavigne, L., Vanos, J., Lawson, D., & Tjepkema, M. (2018). Associations between long-term PM<sub>2.5</sub> and ozone exposure and mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CANHEC), by spatial synoptic classification zone. *Environment International*, 111, 200 - 211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.11.030>
- Carpentieri, M., Kumar, P., & Robinsb, a. (december de 2012). Wind tunnel measurements for dispersion modelling of vehicle wakes. *Atmospheric Environment*, 62, 9-25. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.019>
- Carrasco, C. (2018). *Concentración de contaminantes sólidos sedimentables para el periodo mayo - junio 2017 en el entorno de la upn y su relación con las normas de la OMS*. Cajamarca, Peru: a Universidad Privada del Norte. Obtenido de [http://refi.upnorte.edu.pe/bitstream/handle/11537/14073/Calua Carrasco Carlos Elder](http://refi.upnorte.edu.pe/bitstream/handle/11537/14073/Calua%20Carrasco%20Carlos%20Elder)
- CEUPE. (2020). *¿Cuáles son los efectos de la contaminación atmosférica?* Obtenido de <https://www.ceupe.com/blog/cuales-son-los-efectos-de-la-contaminacion-atmosferica.html>
- Cheng, Y. (2011). *Condensation particle counters*. John Wiley & Sons: Hoboken, Nueva Jersey .
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnet, R., Anderson, R., Frostad, J., Estep, K., . . . Forouzanfar, M. H. (2017, Mayo 13). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air

- pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *THE LANCET*, 389, 1907-1918. doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Cole-Hunter, T., Morawska, L., Stewart, I., Jayaratne, R., & Solomon, C. (2012). Inhaled particle counts on bicycle commute routes of low and high proximity to motorised traffic. *Atmospheric Environment*, 61, 197-203. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.041>
- Conde Riaño, M. P. (2021). ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO ASOCIADAS A UNA VÍA DE ALTO FLUJO VEHICULAR EN EL SUR DE CALI. *Universidad Autonoma de Cali*, 55.
- Obtenido de [https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/13198/T09940\\_Estudio%20exploratorio%20de%20la%20variacion%20espacial%20de%20las%20concentraciones%20de%20material%20particulado%20asociadas%20a%20una%20v%C3%ADa%20de%20alto%20flujo%20vehicular%20en%20el%20](https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/13198/T09940_Estudio%20exploratorio%20de%20la%20variacion%20espacial%20de%20las%20concentraciones%20de%20material%20particulado%20asociadas%20a%20una%20v%C3%ADa%20de%20alto%20flujo%20vehicular%20en%20el%20)
- Créso, A., David, M., Krecla, P., Costa, V., Moreirado, M., & Corrêad, M. P. (2016). Hotspots of black carbon and PM<sub>2.5</sub> in an urban area and relationships to traffic characteristics. *Environmental Pollution*, 218, 475-486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.027>
- Créso, A., Krecl, P., Brimblecombe, P., Yoshikazu, G., Danziger, J., & Moreno, F. (2021). Spatio-temporal variability of airborne particulate matter in the São Paulo subway. *Building and Environment*, 189, 107526. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107526>
- Crocchianti, S., Del Sarto, S., Ranalli, M., Moroni, B., Castellini, S., Petroselli, C., & Cappelletti, D. (2021). Spatiotemporal correlation of urban pollutants by long-term measurements on a mobile observation platform. *Environmental Pollution*, 268, 115645. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115645>
- DANE. (23 de 02 de 2020). *Censo General 2018 Proyecciones de Población*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

- DeLuca, P., Corr, D., Wallace, J., & Kanaroglou, P. (2012). Effective Mitigation Efforts to Reduce Road Dust Near Industrial sites: Assessment by Mobile Pollution Surveys. *Journal of Environmental Management*, 112-118. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.023>
- DeMarini, D. (2013). Genotoxicity biomarkers associated with exposure to traffic and near-road atmospheres: a review. *Mutagénesis*, 18(5), 485–505. doi:10.1093/mutage/get042
- Deshmukh, P., Isakov, V., Venkatram, A., Yang, B., Zhang, K., L. R., & Baldauf, R. (2019). The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 12, 259 - 270.
- DIGESA. (2006). *Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestion de los datos*. Direccion General de Salud Ambiental.
- Dons, E., Panis, L., Martine, V. P., Theunis, J., & Wets, G. (2012). Personal exposure to Black Carbon in transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 51, 392-398.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.020>
- Echeverri, C., & Maya, G. (2008). Relación entre las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) y respirables (PM<sub>10</sub>) en la ciudad de Medellín. *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*, 7(12), 23 - 42.
- EMEP. (2021). *WebDab:Datos de emisiones notificados*. Obtenido de Centre on emssion inventories and projections: <https://www.ceip.at/webdab-emission-database/reported-emissiondata>
- Engel-Cox, J., NguyenThi, K., Donkelaar, A., Martince, R., & Zelld, E. (2013). Toward the next generation of air quality monitoring: Particulate Matter. *Atmospheric Environment*, 80, 584-590.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.016>
- EPA. (2004). Air Quality Criteria for Particulate Matter. *Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division*, 99.
- EPA. (2009). *“Integrated Science Assessment for Particulate Matter*. Obtenido de EPA/600/R-08/139F
- EPA. (19 de Enero de 2017). *Effects of particulate matter (PM) on health and the environment*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter->

Harrison, R. M., Allan, J., Carruthers, D., Heal, M. R., Lewis, A. C., Marnier, B., . . . Williams, A. (2021).  
Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review.  
*Atmospheric Environment*, 262, 118592. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118592>.



- Hitchins, J. (2020). Submicron particle concentrations from vehicle emissions near a major road. *Atmospheric Environment*, 51-59. doi:10.1016 / S1352-2310 (99) 00304-0
- Hong-di, H., & Wei-Zhen, L. (2012). Partículas de aerosoles urbanos en los bordes de las carreteras de Hong Kong: distribución del tamaño y niveles de concentración con el tiempo. *Stoch Environ Res Risk Assessment*, 177–187.
- Ingetec. (2017). Modelo de dispersión de contaminantes “Estructuración técnica de la primera línea del metro de Bogotá (PLMB)”, ubicado en el área urbana de Bogotá, departamento de Cundinamarca, para la empresa Ingetec S.A. *K2 Ingeniería*.
- INS. (2018). *Carga de enfermedad ambiental*. Bogota: Ministerio de Salud. Obtenido de <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>
- Kabindra , S., Kremer , P., Henderson, K., McMahon, M., Peltier, R., Bromberg , S., & Stewart, J. (2019, Diciembre). Mobile monitoring of air and noise pollution in Philadelphia neighborhoods during summer 2017. *Environmental Pollution*, 225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113195>
- Karagulian, F., Belis, C., Francisco, C., Prüss-Ustün, A., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. .. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475-483. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>
- Kaur, S., Nieuwenhuijse, M., & Colvile, R. (2007). Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, 41(23), 4781-4810. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.002>
- Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>

- Kinney, P., Gatari, M., Volavka, N., Ngo, N., Ndiba, P., Law, A., . . . Sclar, E. (2011). Traffic impacts on PM<sub>2.5</sub> air quality in Nairobi, Kenya. *Environmental Science & Policy*, 14(4), 369-378.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.02.005>
- Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G., & Ragas, M. (2017). Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1265. doi:<https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>
- Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R., Renjun, M., Hughes, e., . . . Newbo, B. (2009). Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Journal of the Institute of Health Effects*, 5-114.
- Kukutschová, J., & Filip, P. (2018). Chapter 6 - Review of Brake Wear Emissions: A Review of Brake Emission Measurement Studies: Identification of Gaps and Future Needs. *Non-Exhaust Emissions*, 123-146. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811770-5.00006-6>
- Kuttler, W., & Litschke, T. (2008). On the reduction of urban particle concentration by vegetation a review. *Meteorologische Zeitschrift*, 229-240. doi: 10.1127/0941-2948/2008/0284
- Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F., & Dockery, D. (2006). Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 667 - 672.  
doi:<https://doi.org/10.1164/rccm.200503-443OC>
- Larson, T., Gould, T., Riley, E., Austin, E., Fintzi, o., Sheppard, L., . . . Simpson, C. (2017). Ambient air quality measurements from a continuously moving mobile platform: Estimation of area-wide, fuel-based, mobile source emission factors using absolute principal component scores. *Atmospheric Environment*, 152, 201-211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.037>
- Lawrence, S., Sokhi, R., Ravindra, K., Mao, H., Prain, H. D., & Bullc, I. D. (2013). Source apportionment of traffic emissions of particulate matter using tunnel measurements. *Atmospheric Environment*, 77, 548-557. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.040>

- Legarreta, A., Corral, A. D., Torres, J., & Flores, J. (2016). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Cultura Científica y Tecnológica*, 12(56). Retrieved from Cultura Científica y Tecnológica: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/818>
- Lei, X.-N., Bian, J.-W., Xiu, G.-L., Hu, X.-F., Gu, X.-S., & Bian, Q.-G. (2017). The mobile monitoring of black carbon and its association with roadside data in the Chinese megacity of Shanghai. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(8), 7482-7489. doi:10.1007/s11356-017-8454-2.
- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Zhou, R., Huang, N., Wu, W., & Liu, C. (2020). Spatial distribution characteristics of gaseous pollutants and particulate matter inside a city in the heating season of Northeast China. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102302>
- Li,
- Li, M. J., Yang, H., Zhao, L., Liu, y., Xu, H., Fan, Y., . . . Zhanga, X. (2021). Short-term exposure to ambient particulate matter and outpatient visits for respiratory diseases among children: A time-series study in five Chinese cities. *Chemosphere*, 263, 128214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128214>
- Liu, B., He, M., Wu, C., Li, J., Li, Y., Lau, N. T., . . . Li, Y. J. (2019). Potential exposure to fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and black carbon on jogging trails in Macau. *Atmospheric Environment*, 198, 23-33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.024>
- Maciejczyk, P., Offenber, J., Clemente, J., Blaustein, M., Thurston, G., & Chi, L. (2004). Ambient Pollutant Concentrations Measured by a Mobile Laboratory in South Bronx, NY. *Atmospheric Environment*, 38(31), 5283-5294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.062>
- MADS. (2019). *Emisiones*. Obtenido de Sistema de Informacion Ambiental de Colombia: <http://www.siac.gov.co/emisionesaire>
- Martinez, E., & Díaz, Y. (2004). *Contaminación atmosférica*. España: Universidad de Castilla- la Mancha.

- Medina, N., & Larios, C. (2018). *Sistema de monitoreo remoto, inalámbrico y en tiempo real de los niveles de concentración de dos contaminantes atmosféricos definidos en la norma técnica Nicaraguense de Calidad del Aire*. Managua: Universidad Nacional de Ingeniería .
- Merbitz, H., Fritz, S., & Schneider, C. (2012). Mobile measurements and regression modeling of the spatial particulate matter variability in an urban area. *Science of the Total Environment*, 438, 389-403. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.049>
- MinAmbiente. (17 de Octubre de 2016). *En cuenta regresiva para limpiar Colombia*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2512-en-cuenta-regresiva-para-limpiar-colombia>
- Minambiente. (26 de Julio de 2021). *Contaminación Atmosférica*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/contaminacion-atmosferica>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). DIAGNOSTICO NACIONAL DE SALUD AMBIENTAL. *Min Ambiente*. Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>
- Narvaez, M. (2019). *Efecto fitotóxico del material particulado PM10*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Núñez, S. (2004). Altura de la capa de mezcla : caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna. *Madrid: Universidad Complutense de*.
- O’Ryan, R., & Larraguibel, L. (2000). Contaminación del aire en Santiago: ¿qué es, qué se ha hecho,. 4, 153-191. Obtenido de <http://www.dii.uchile.cl/~revista/ArticulosVol4-N1/ORyan-R%20y%20Larraguibel-L.pdf>
- Okokon, E., Tuomi, T. Y., Turunen, A., Tiittanen, P., Juutilainen, J., & Lanki, T. (2018). Traffic noise, noise annoyance and psychotropic medication use. *Environment International*, 119, 287-294. doi:<https://ezproxy.cuc.edu.co:2067/10.1016/j.envint.2018.06.034>

- Oliva, P., Garcia, K., Cortez, R., Davila, R., Alfaro, M., & Duke, V. (2001). *Manual de Laboratorio*. Mexico: Swisscontact.
- OMS. (02 de Mayo de 2018). *Calidad De Aire y Salud*. Obtenido de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- ONU. (03 de Junio de 2019). *Cinco razones por las que la contaminación del aire debe importarte*. Obtenido de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/cinco-razones-por-las-que-la-contaminacion-del-aire-debe>
- OpenStreetMap. (2019). Area metropolitana de Barranquilla. *Alcaldia de Barranquilla*.
- Ostro, B., Hu, J., Goldberg, D., Reynolds, P., Hertz, A., Bernstein, L., & Kleeman, M. (2015). Associations of mortality with long-term exposures to fine and ultrafine particles, species and sources: results from the California Teachers Study Cohort. *Environ Health Perspect*, 123(6), 549 - 556. doi: 10.1289/ehp.1408565
- Oviedo, R., & Porras, B. (2017). *Distribución Temporal de la Fracción Respirable PM10 y la Correlación con las Variables meteorológicas en la universidad de*. Barranquilla: Universidad de la Costa.
- Padró, L., Patton, A., Trull, J., Zamore, W., Brugge, D., & Durant, J. (2012). Mobile Monitoring of Particle Number Concentration and Other Traffic-related air Pollutants in a Near-highway Neighborhood Over the Course of a Year. *Atmospheric Environment*, 61, 253-264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.088>
- Palacio, D., Zafra, C., & Rodriguez, J. (2014). Evaluation of the air quality by using a mobile laboratory: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia). *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 153-166.
- Patton, A., Perkins, J., Zamore, W., Levy, J., Brugge, D., & Durant, J. (2014). Spatial and temporal differences in traffic-related air pollution in three urban neighborhoods near an interstate highway. *Atmospheric Environment*, 99, 309-321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.072>
- Perevochtchikova, M. (2013). Environmental Impact Assessment and the Importance of Environmental Indicators. *Management and public policy*, 22(2), 283-312.

- Pineda, L. (2017). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia*. Bogota: IDEAM.
- Pinto, L. C., & Méndez, J. F. (2016). Evaluación del impacto en calidad del aire, asociado a resuspensión de material particulado por la pavimentación de la vía principal de Caracolí - Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. *Universidad de la Salle*, 109. Obtenido de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1324&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1324&context=ing_ambiental_sanitaria)
- Pirjola, L., Lahde, T., Niemi, J., Kousa, A., Ronkko, T., Karjalainen, P., . . . R. (2012). Spatial and Temporal Characterization of Traffic Emissions in Urban Microenvironments with a Mobile Laboratory. *Atmospheric Environment*, 156-167.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.022>
- Pirjola, L., Parviainen, H., Hussein, T., Valli, A., Hameri, k., Aalto, P., . . . Hillamo, R. (2004). Sniffer-a Novel Tool for Chasing Vehicles and Measuring Traffic Pollutants. *Atmospheric Environment*, 3625-3635. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.047>
- Pope, C., Burnett, R., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 287(9), 1132 - 1141. doi:10.1001/jama.287.9.1132.
- Puigcerver, M., & Carrascal, D. (2012). *El medio atmosférico: meteorología y contaminación*. Barcelona: Universidad de Barcelona. Obtenido de <http://www.publicacions.ub.edu/refs/indices/07022.pdf>
- Querol, X. (2018). *Contaminación y calidad del aire urbano. Unas primeras cuestiones de partida*. Madrid: Fundación Gas Natural Fenosa.
- Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Revista Bistua*, 8(1), 1-20.
- Rafael Mora. (2000). *Teoria De La Interpolacion*. Nariño: Instituto Universitario Santiago Nariño.
- Ramirez, O. (2018). Chemical composition and source apportionment of PM10 at an urban background site in a high-altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia). *Environmental Pollution*, 233, 142-155.

- RemedyOne. (2020). Contador de particulas portatil HAL TECHNOLOGY HPC601. *Calright Instruments*.
- Rodriguez, D., Quintero, A., Gonzales, Y., Cuesta , O., & Sanchez, A. (2015). Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: Su relación con condiciones sinópticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30, 1-15.
- Rojas, N. (2004). Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel y biodiesel. *Revista de Ingenieria*, 0121-4993.
- Romero, M. (2006). Air pollution: its impact as a health problem. *Scielo*, 1561-3003.
- Romero, M., Olite, F., & Álvarez, M. (2006). Air pollution: its impact as a health problem. *Rev Cubana Hig Epidemiol*, 44(2).
- Salguero, J. (2016). *Determinación de la concentración de material particulado en la avenida Rodolfo Baquerizo Nazur, entre las etapas III, IV, V, VII, VIII, IX de la ciudadela la Alborada, de la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil: Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/11549>
- Salinas, J. (2011). *Caracterizacion fisico-quimica del material particulado en la comunidad foral de navarra*. España: Universidad De Navarra.
- Samad, A., & Vogt, U. (2020). Investigación de la calidad del aire urbano mediante la realización de mediciones móviles utilizando una bicicleta (MOBAIR). *Urban Climate*, 33, 100650. doi:<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100650>
- Shiva, S., Pavan, Y., Narayana, M., Seema, K., & Pooja, R. (2019). Mobile monitoring of air pollution using low cost sensors to visualize spatio-temporal variation of pollutants at urban hotspots. *Sustainable Cities and Society*, 520-535. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.006>
- Simona, A., Dupont, L., Chery, O., Camargo, M., & Cai, C. (2019). Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling. *Journal of Cleaner Production*, 221(1), 398-418. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179>

- Singh, V., Biswal, A., Kesarkar, A., Mor, S., & Ravindra, K. (2020). High resolution vehicular PM10 emissions over megacity Delhi: Relative contributions of exhaust and non-exhaust sources. *Science of The Total Environment*, 699(10), 134273.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134273>
- Snilsberg, B., Myran, T., & Uthus, N. (2008). *Pavement wear and airborne dustpollution in Norway Characterization of the physical and chemical properties of dust particles*. Noruega: Norwegian University of Science and Technology. Obtenido de  
[file:///C:/Users/zahory/Downloads/124334\\_FULLTEXT01.pdf](file:///C:/Users/zahory/Downloads/124334_FULLTEXT01.pdf)
- Spiegel, J., & Maystre, L. (2016). *Control de la contaminacion ambiental*. Obtenido de  
<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+55.+Control+de+la+contaminaci%C3%B3n+ambiental>
- Su, J. G., Hopke, P., Tian, Y., Baldwin, N., Sally W., T., Evans, K., & Rich, D. (2015, December). Modeling particulate matter concentrations measured through mobile monitoring in a deletion/substitution/addition approach. *Atmospheric Environment*, 122, 477-483.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.002>
- Suarez, L., Mesías, S., Iglesias, V., Silva, C., Cáceres, D., & Ruiz, P. (2014). Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile. *Environmental science. Processes & impacts*, 16(6), 1309-1317. doi:10.1039/c3em00648d
- Taheri, A. A. (2019). Black carbon and PM2.5 monitoring campaign on the roadside and residential urban background sites in the city of Tehran. *Atmospheric Environment*, 218.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116928>
- Tan, Y., Lipsky, E., Saleh, R., Robinson, A., & Presto, A. (2014). Characterizing the Spatial Variation of Air Pollutants and the Contributions of High Emitting Vehicles in Pittsburgh, PA. *Environ. Sci. Technol.*, 14186–14194. doi:<https://doi.org/10.1021/es5034074>



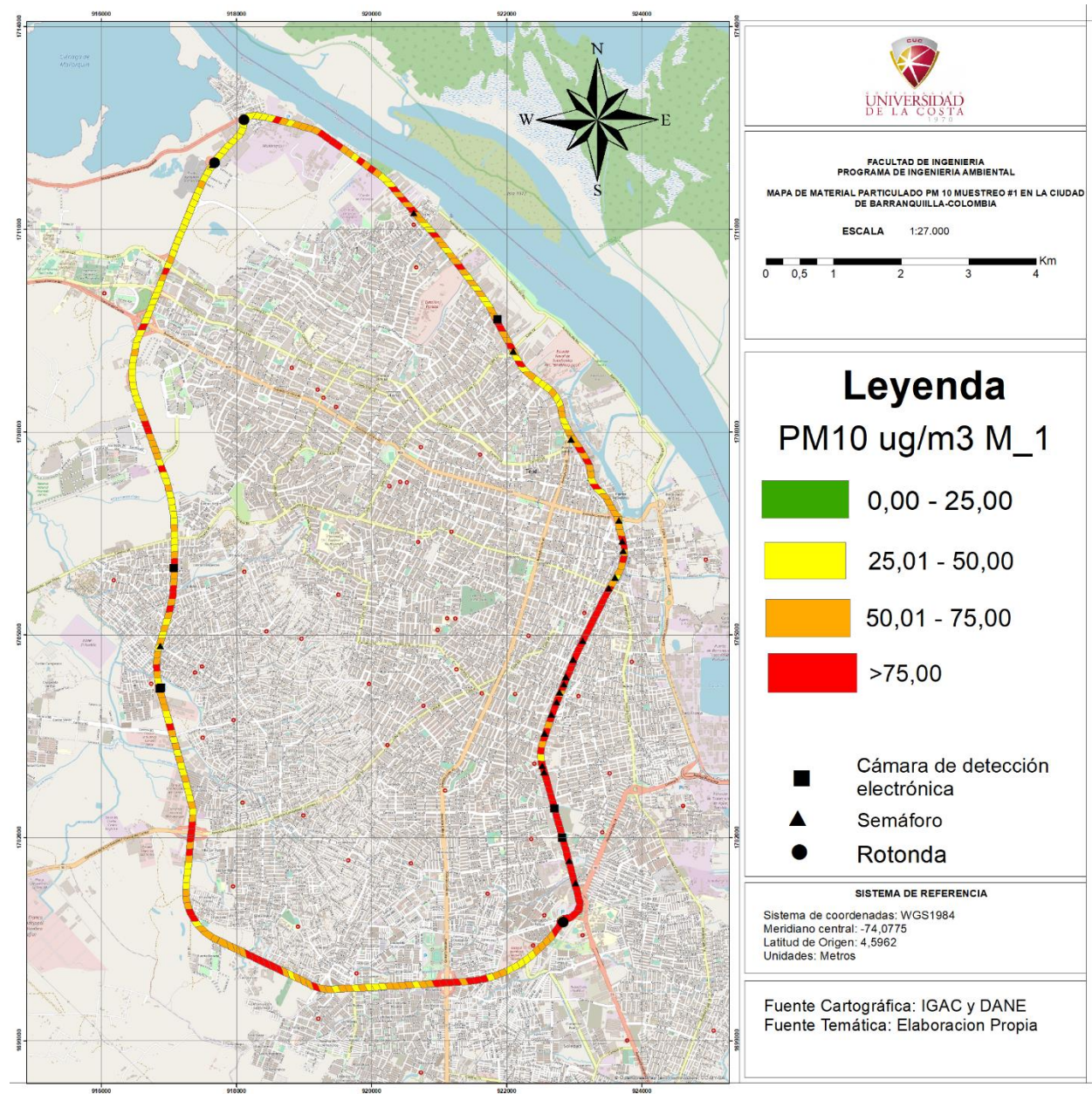
- Tellez, J. (27 de Agosto de 2018). *El sector automotor colombiano prende motores*. Obtenido de <https://www.bbvaresearch.com/wp-content/uploads/2018/09/SituacionAutomotrizActualizacion.pdf>
- Thundiyil, J., Anderson, J., & Stolbach, A. (2012). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166 - 175. doi:10.1007/s13181-011-0203-1
- Toro, M., Ramírez, J., Quiceno, R., & Zuluaga, C. (2001). Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR. *Revista Acodal*, 191, 42-49.
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Outdoor air pollution respiratory health effects in children. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28, 111-118. doi:10.1016/j.rmcl.2016.12.003
- Vallero, D. (2014). *Fundamentals of Air Pollution* (Fifth Edition ed.). Elsevier. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2012-0-01172-6>
- Van den Bossche, J., Peters, J., Verwaeren, J., Botteldooren, D., Theunis, J., & De Baets, B. (2015). Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset. *Atmospheric Environment*, 105, 148-161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.017>
- Vargas, F. y. (2010). Chemical composition and mass closure for airborne particulate matter in Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 105-115.
- Viana, M. d. (2003). *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Vienneau, D., Hoogh, k., Bechle, M., Beelen, R., Donkelaar, A., Randall, M., . . . Marshall, J. (2013). Western European land use regression incorporating satellite- and ground-based-measurements of NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>. *Environmental Science & Technology*, 47(23), 13555-13564. doi:10.1021/es403089q

- Villacrés, M. (2015). *Evaluación de la contaminación atmosférica de la ciudad de Ambato relacionada con el material particulado sedimentable*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Violante, F. S., Barbieri, A., Curti, S., Sanguinetti, G., Graziosi, F., & Mattioli, S. (2006). Urban atmospheric pollution: Personal exposure versus fixed monitoring station measurements. *Chemosphere*, 64, 1722-1729. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.011>
- Wallace, J., Corr, D., & Kanaroglou, P. (2010). Topographic and Spatial Impacts of Temperature Inversions on Air Quality Using Mobile Air Pollution Surveys. *Science of The Total Environment*, 408, 5086-5096. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.020>
- Wang, M., Zhu, T., Zheng, J., Zhang, R., Zhang, S., Xie, X., . . . Li, Y. (2009). Use of a Mobile Laboratory to Evaluate Changes in on-road Air Pollutants During the Beijing 2008 Summer Olympics. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(21), 8247-8263. doi:<https://doi.org/10.5194/acp-9-8247-2009>, 2009.
- Wang, W., Yu, J., Cui, Y., He, J., Xue, P., Cao, W., . . . Wang, Y. (2018). Characteristics of fine particulate matter and its sources in an industrialized coastal city, Ningbo, Yangtze River Delta. *Atmospheric Research*, 203, 105-117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.033>.
- Wang, Y., Xiong, L., & Tang, M. (2017). Toxicity of inhaled particulate matter on the central nervous system: neuroinflammation, neuropsychological effects and neurodegenerative disease. *Journal of Applied Toxicology*, 37(6), 644 - 667. doi:10.1002/jat.3451
- Wang, Z., Zhong, S., He, H., Ren, Z., & Cai, M. (15 de agosto de 2018). Fine-scale variations in PM2.5 and black carbon concentrations and corresponding influential factors at an urban road intersection. *Building and Environment*, 141, 215-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.042>
- Wang, Z.-y., diHe, H., Zhao, H., & Peng, Z. (15 de julio de 2021). Spatiotemporal analysis of pedestrian exposure to submicron and coarse particulate matter on crosswalk at urban intersection. *Building*

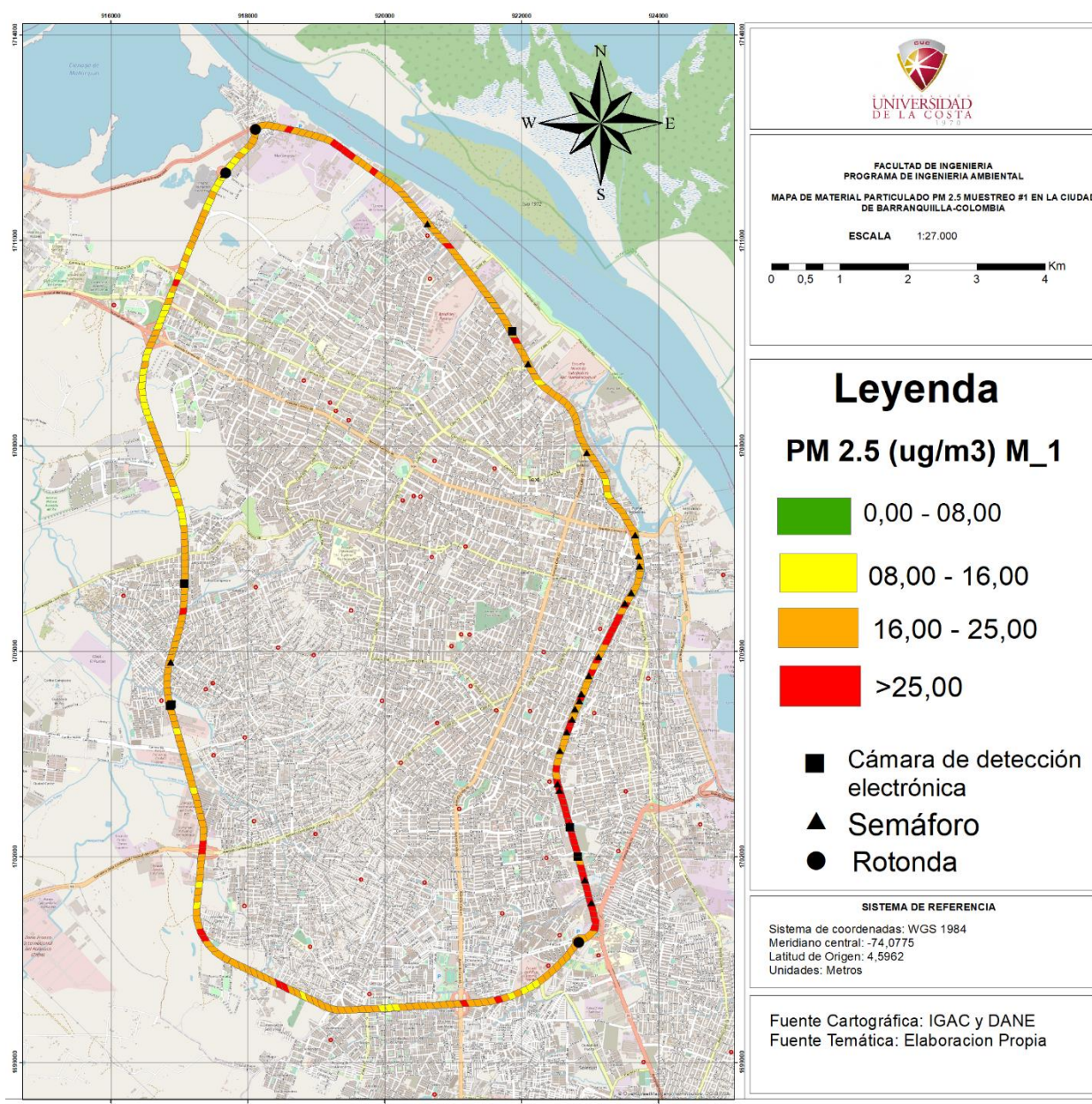
- and Environment*, 204. Obtenido de <https://ezproxy.cuc.edu.co:2067/10.1016/j.buildenv.2021.108149>
- Wen, Y., Wang, H., Larson, T., Kelpd, M., Zhang, S., Wu, Y., & Marshallb, J. (2019). On-highway vehicle emission factors, and spatial patterns, based on mobile monitoring and absolute principal component score. *Science of The Total Environment*, 676, 242-251. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.185>
- WHO. (2002). *Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine*. Ispra, Italia: European Communities, World Health Organization.
- Wu, Y., Wang, Y., Wang, L., Song, G., Gao, J., & Yu, L. (2020). Application of a taxi-based mobile atmospheric monitoring system in Cangzhou, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102449. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102449>
- Wurzler, S., Reisin, T., & Levin, Z. (2000). Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions. *Journal of Geophysical Research*, 4501-4512. doi:<https://doi.org/10.1029/1999JD900980>
- Xihao, D., Yi, Z., Cong, L., Jianlong, F., Feng, Z., Peng, D., . . . Wanying, S. (2021). Fine Particle Components and Subclinical Outcomes of Cardiovascular Disease: A Multicenter Study in China. *Total Environmental Science*, 759, 143555. doi:doi: 10.1016 / j.scitotenv.2020.143555
- Zawacki, M., Baker, K., Phillips, S., Davidson, K., & Wolfe, P. (septiembre de 2018). Mobile source contributions to ambient ozone and particulate matter in 2025. *Atmospheric Environment*, 188, 129-141.
- Zhang, Y., Gu, Z., & Yu, C. (2017). Large Eddy Simulation of Vehicle Induced Turbulence in an Urban Street Canyon with a New Dynamically Vehicle-Tracking Scheme. *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 865-874. doi:<https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.05.0204>
- Zoran, M., Savastru, R., Savastru, D., & Tautan, M. (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM2.5 and PM10 particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Science of The Total Environment*, 738(10), 139825. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139825

12. Anexos

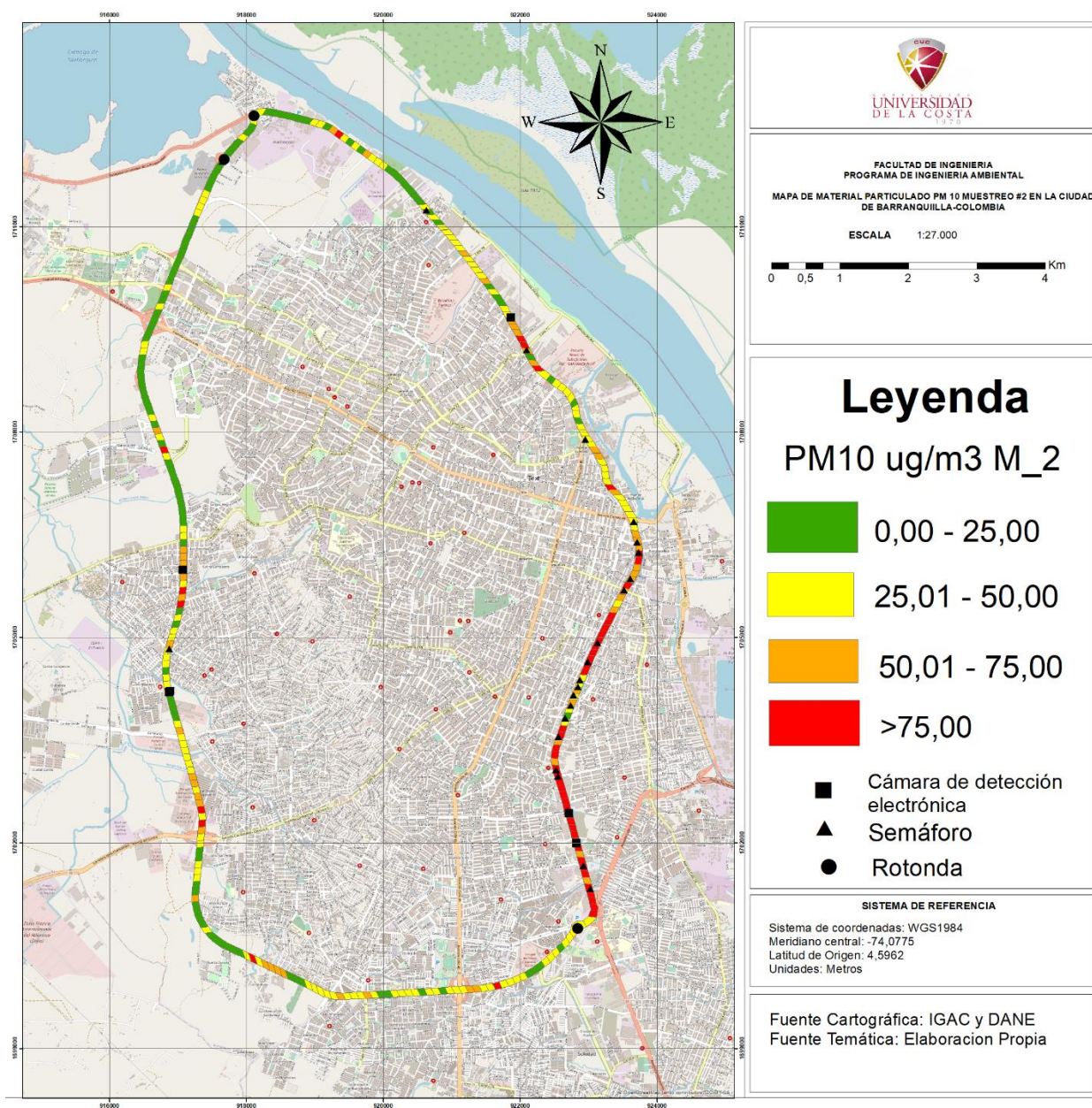
Anexo 1: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 1



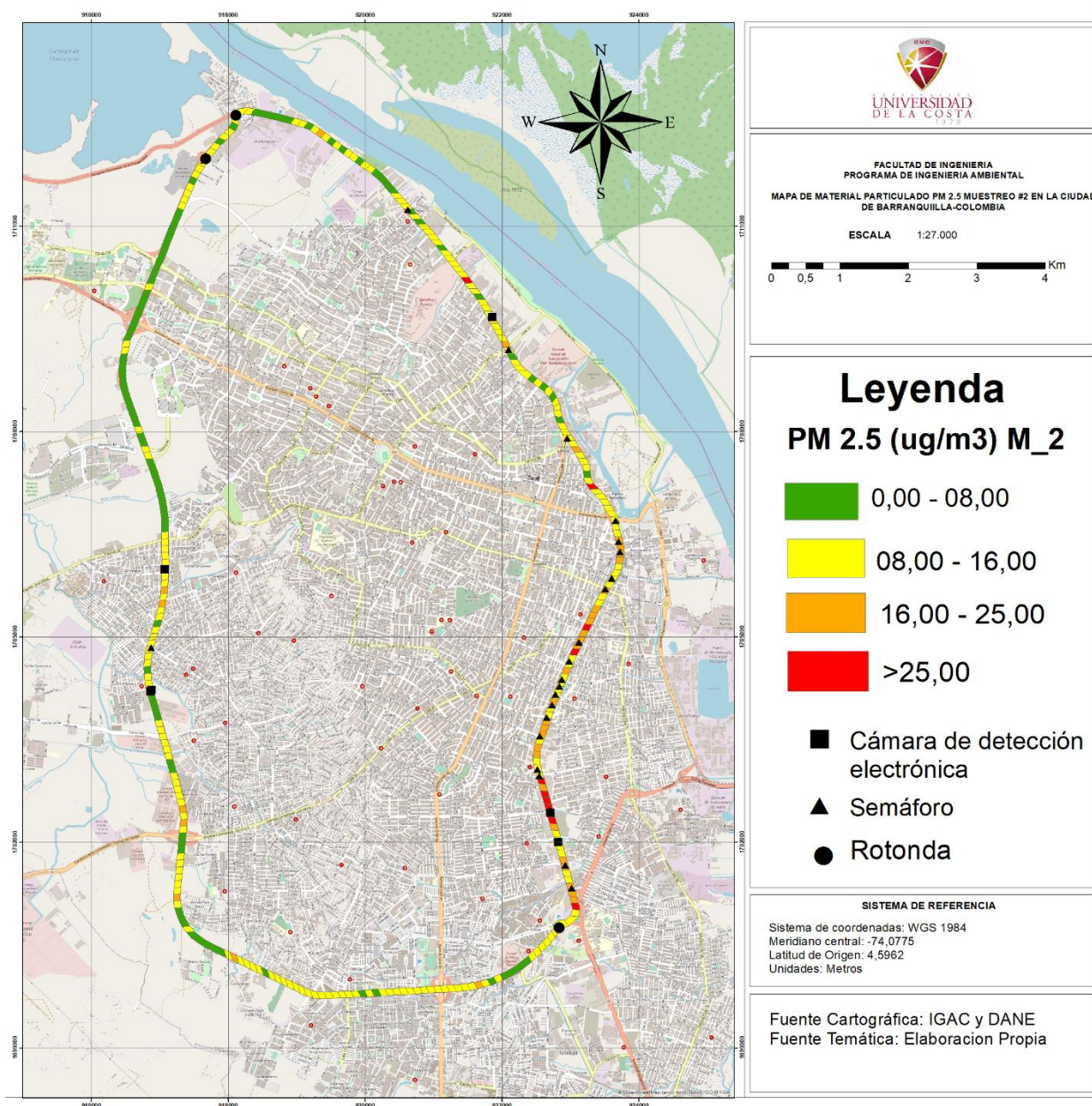


*Anexo 2: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM<sub>2.5</sub> para el muestreo 1*

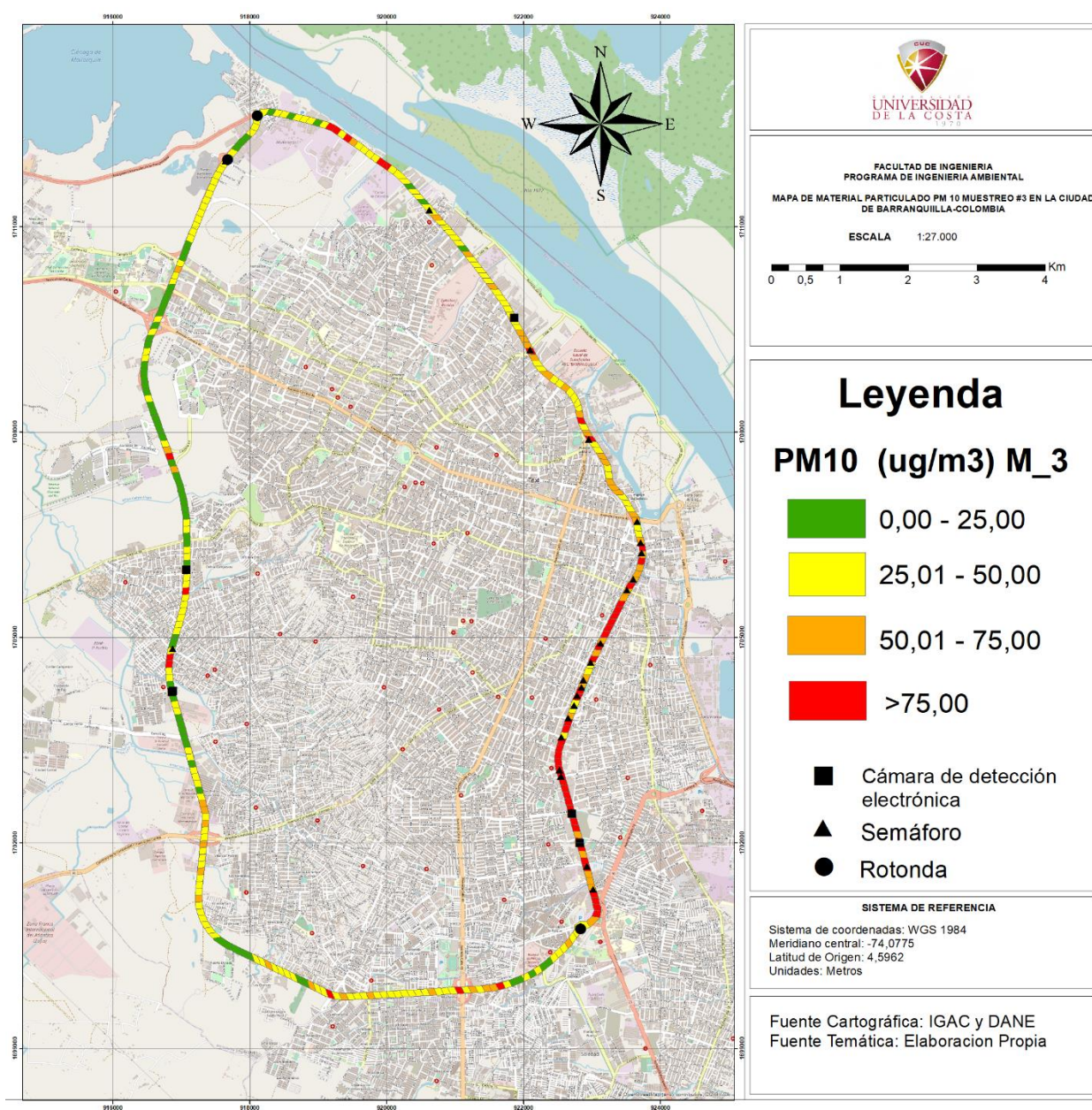


*Anexo 3: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 2*

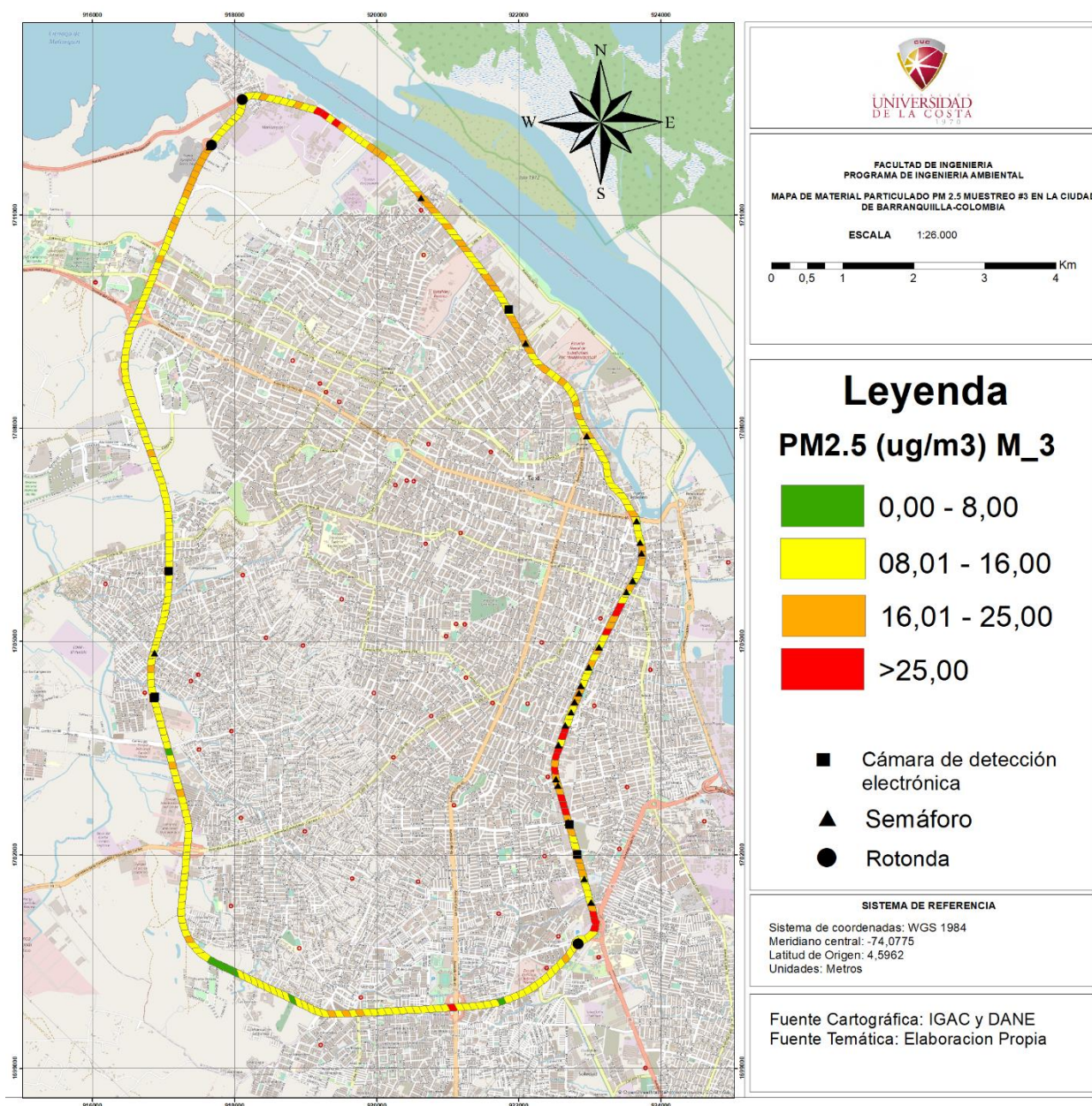


*Anexo 4: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM2.5 para el muestreo 2.*

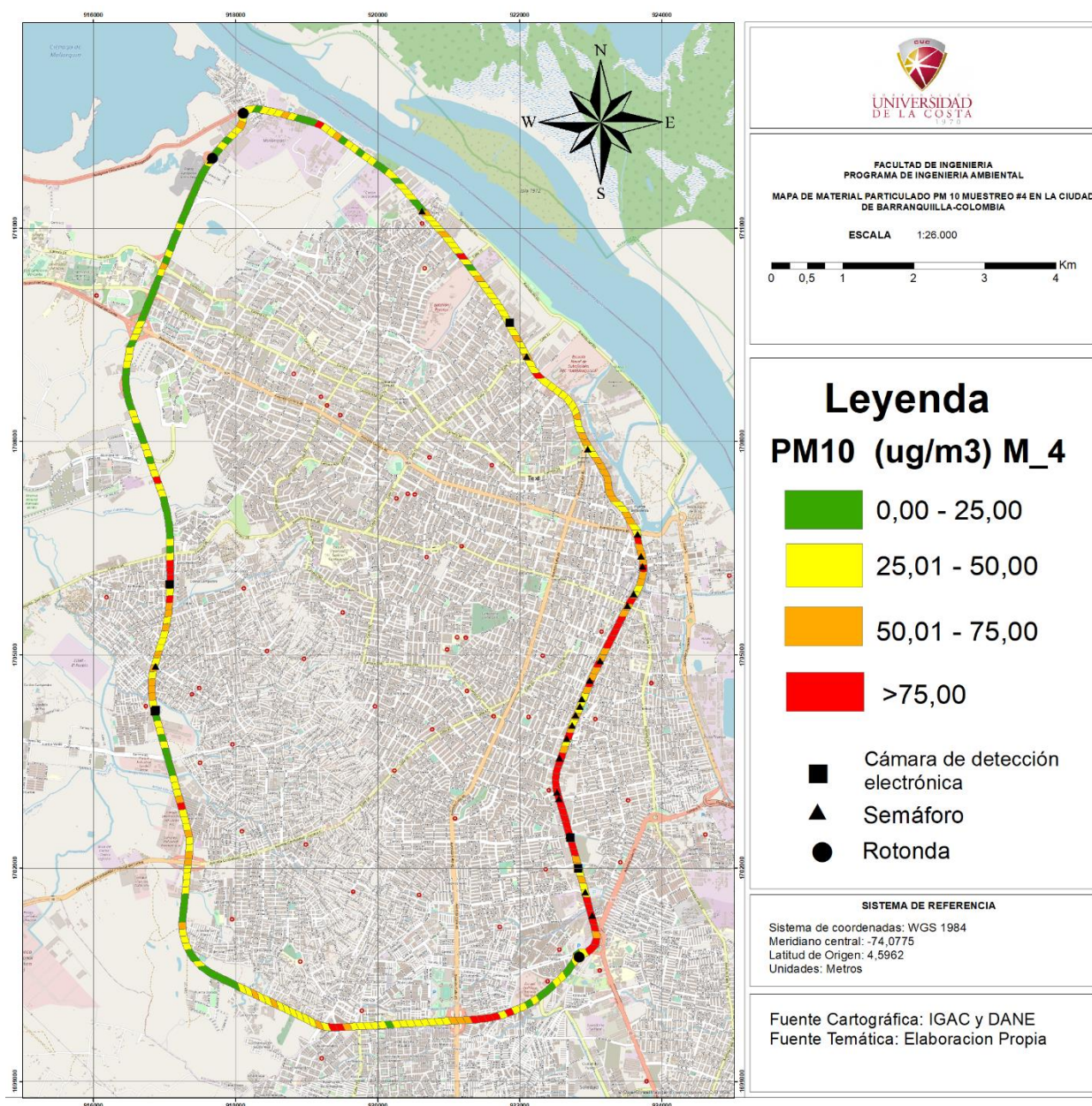


*Anexo 5: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 3.*

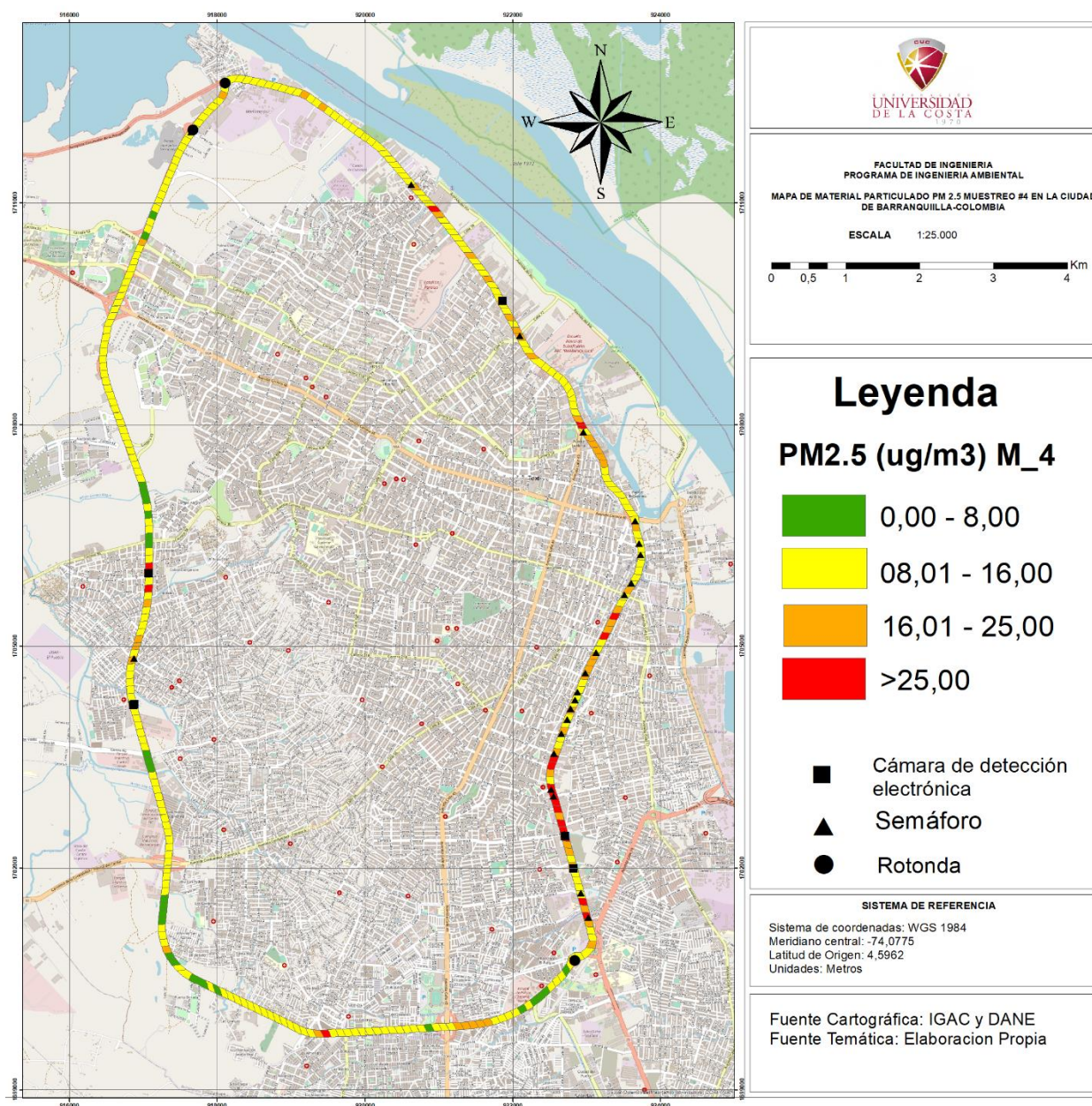


*Anexo 6: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM<sub>2.5</sub> para el muestreo 3.*



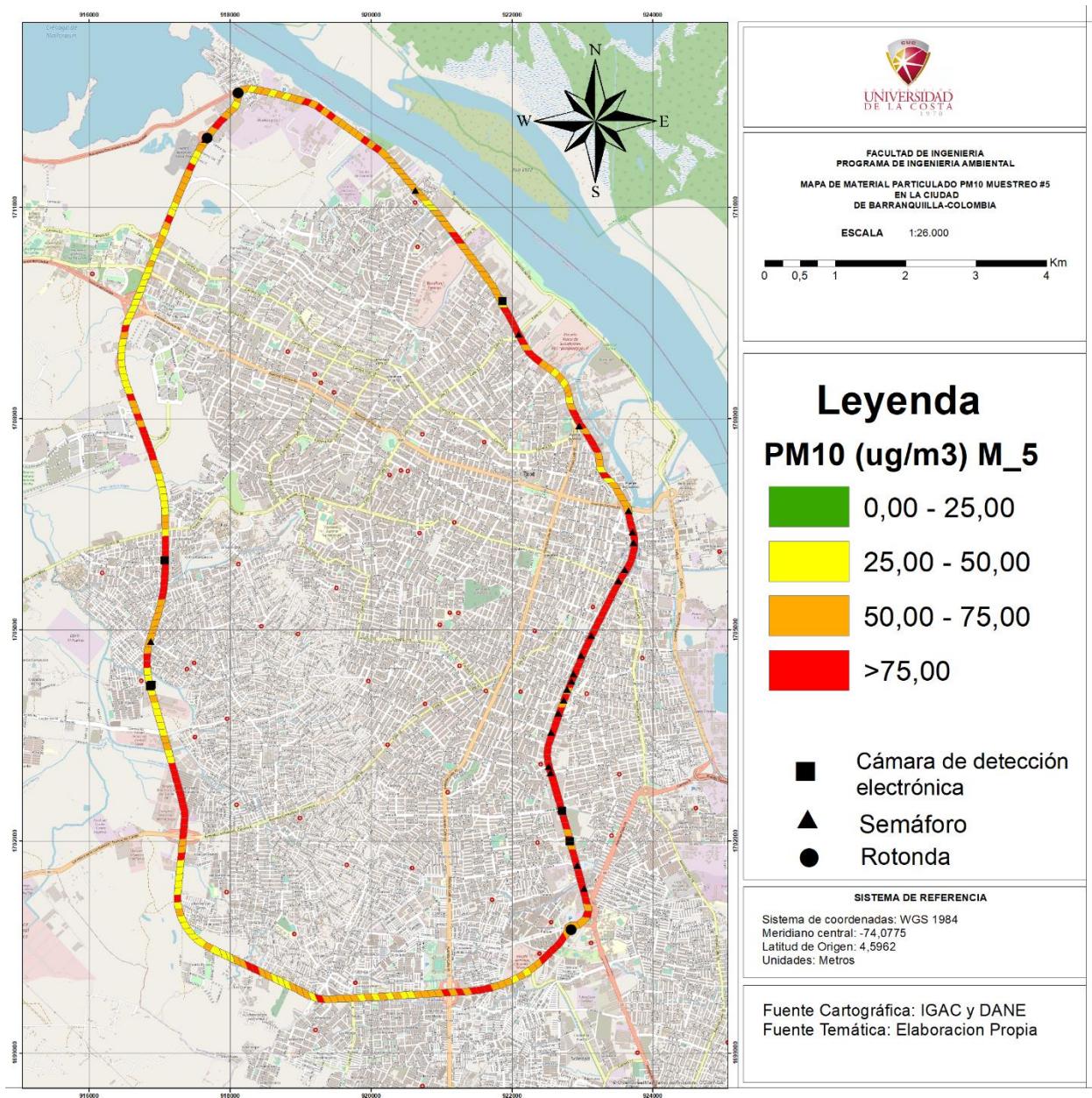
*Anexo 7: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 4.*



*Anexo 8: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM2.5 para el muestreo 4.*

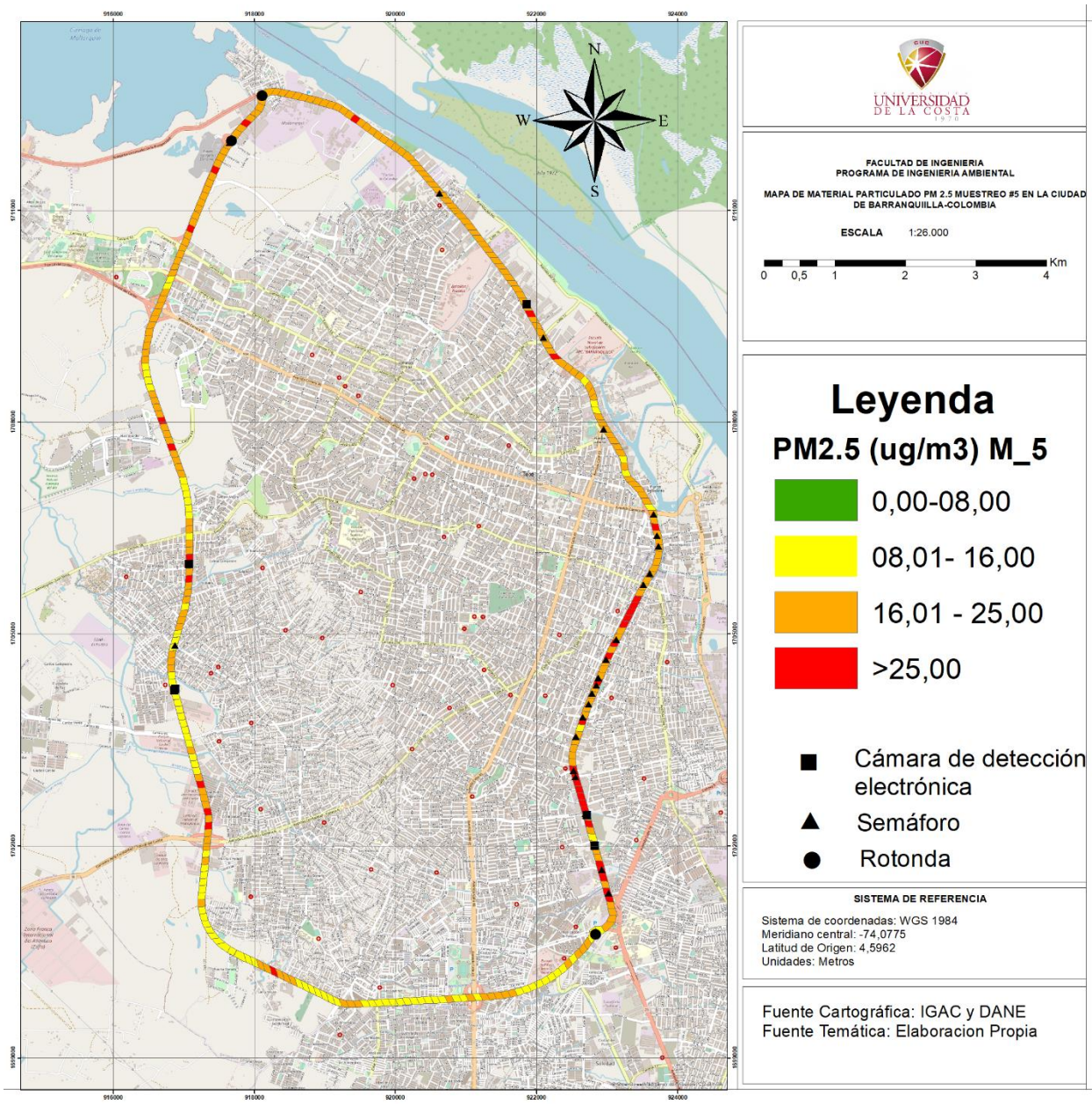


Anexo 9: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 5.



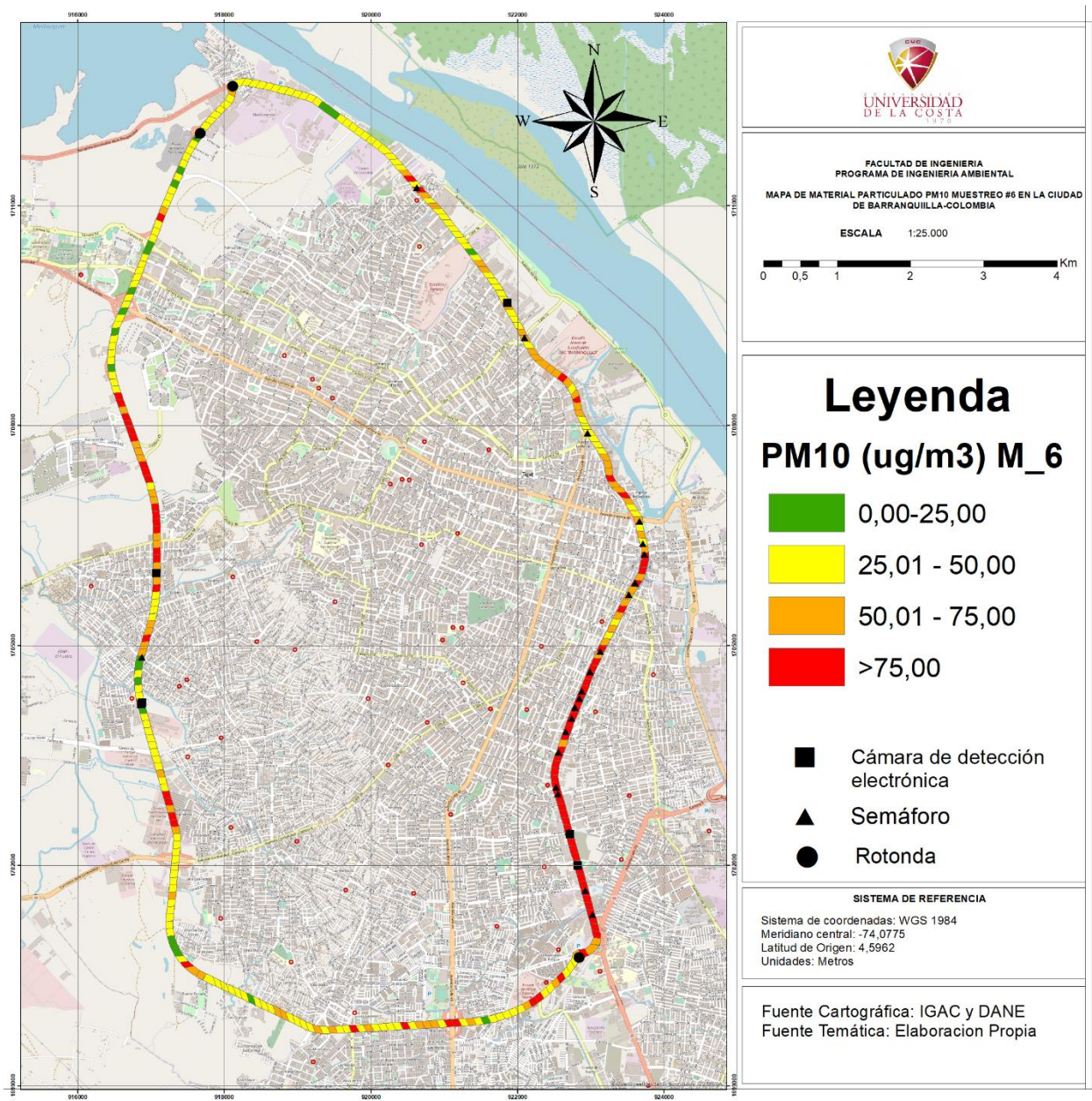


Anexo 10: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM2.5 para el muestreo 5.

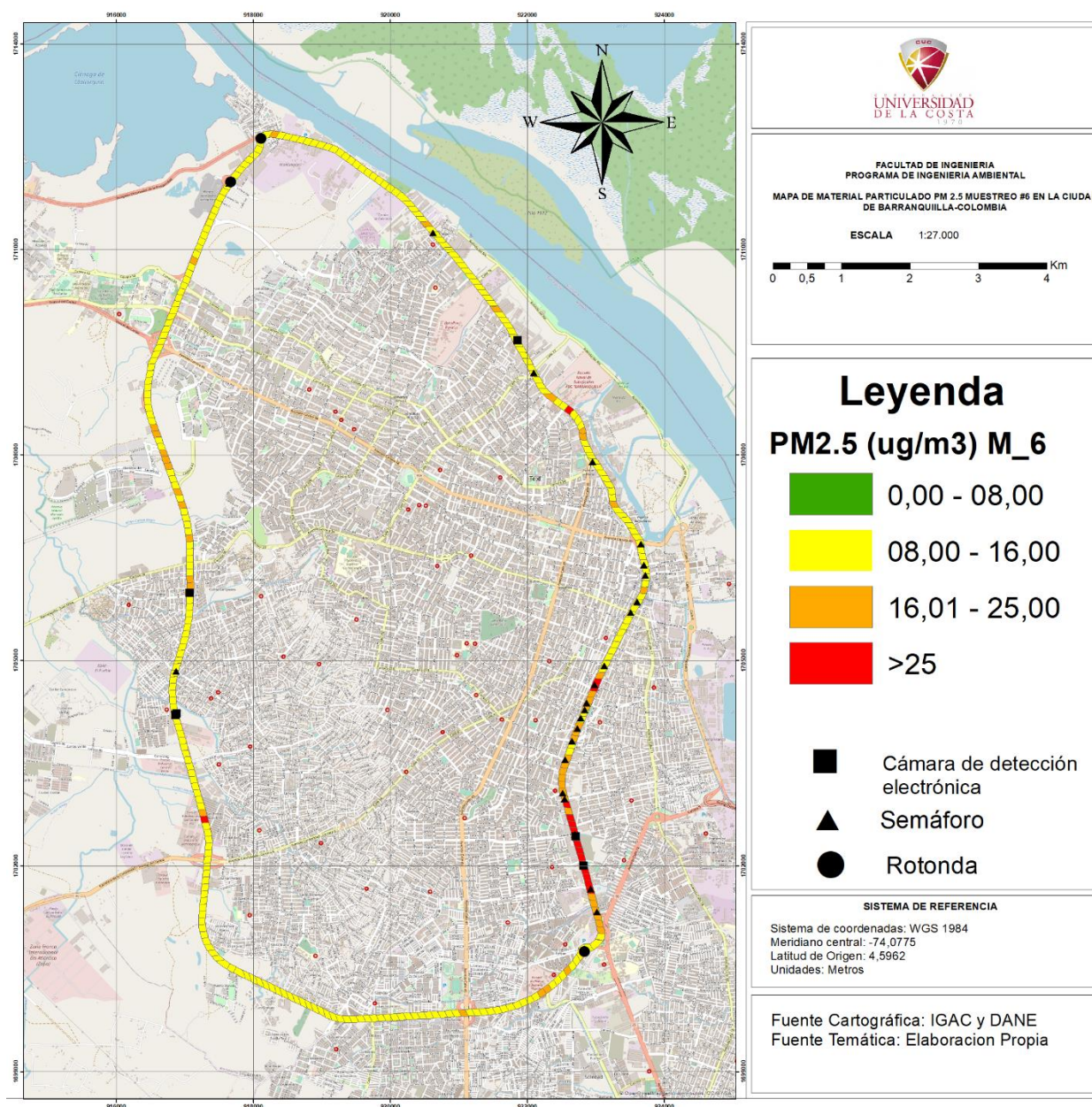




Anexo 11: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 6.

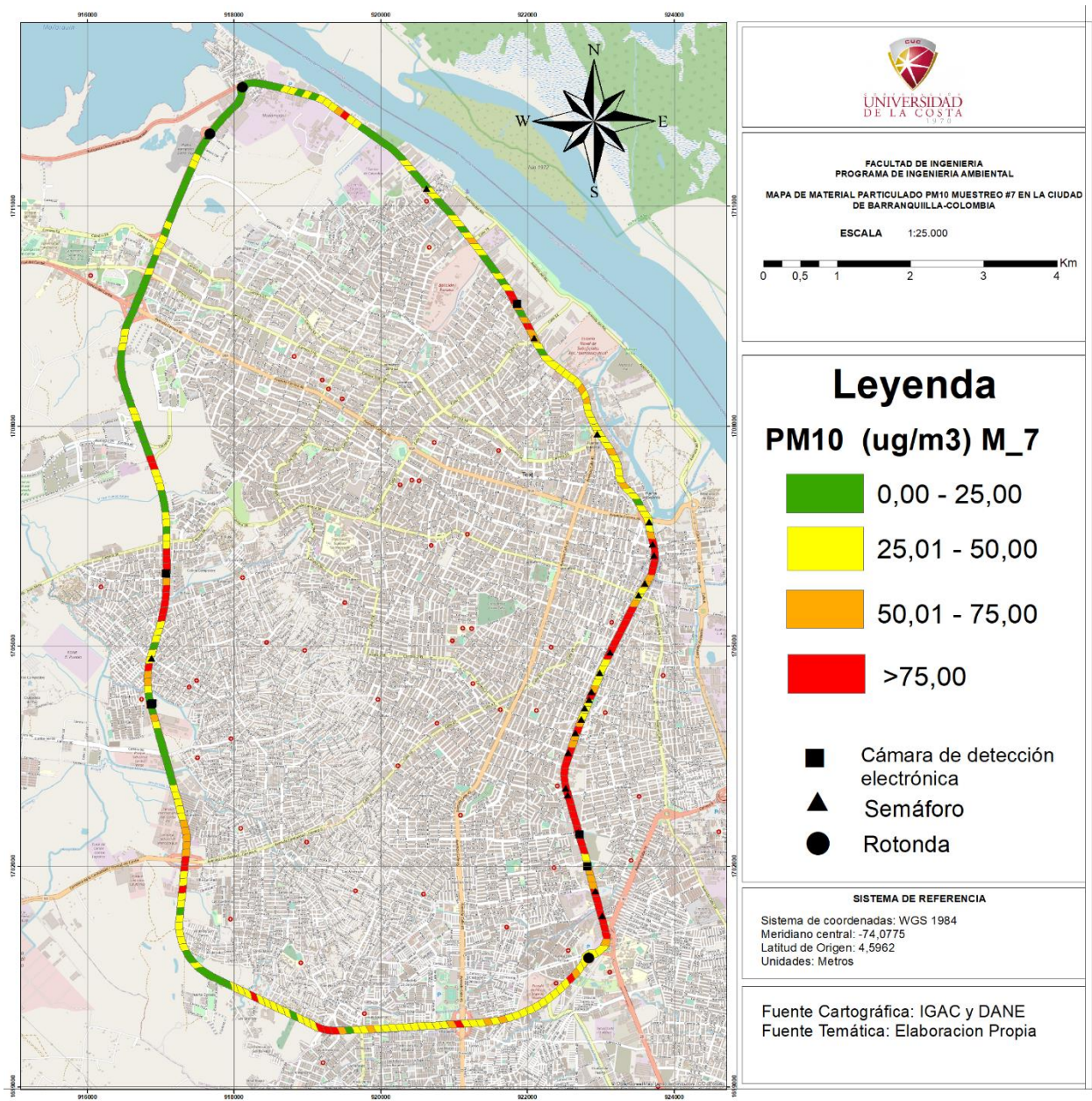




*Anexo 12: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM<sub>2.5</sub> para el muestreo 6.*

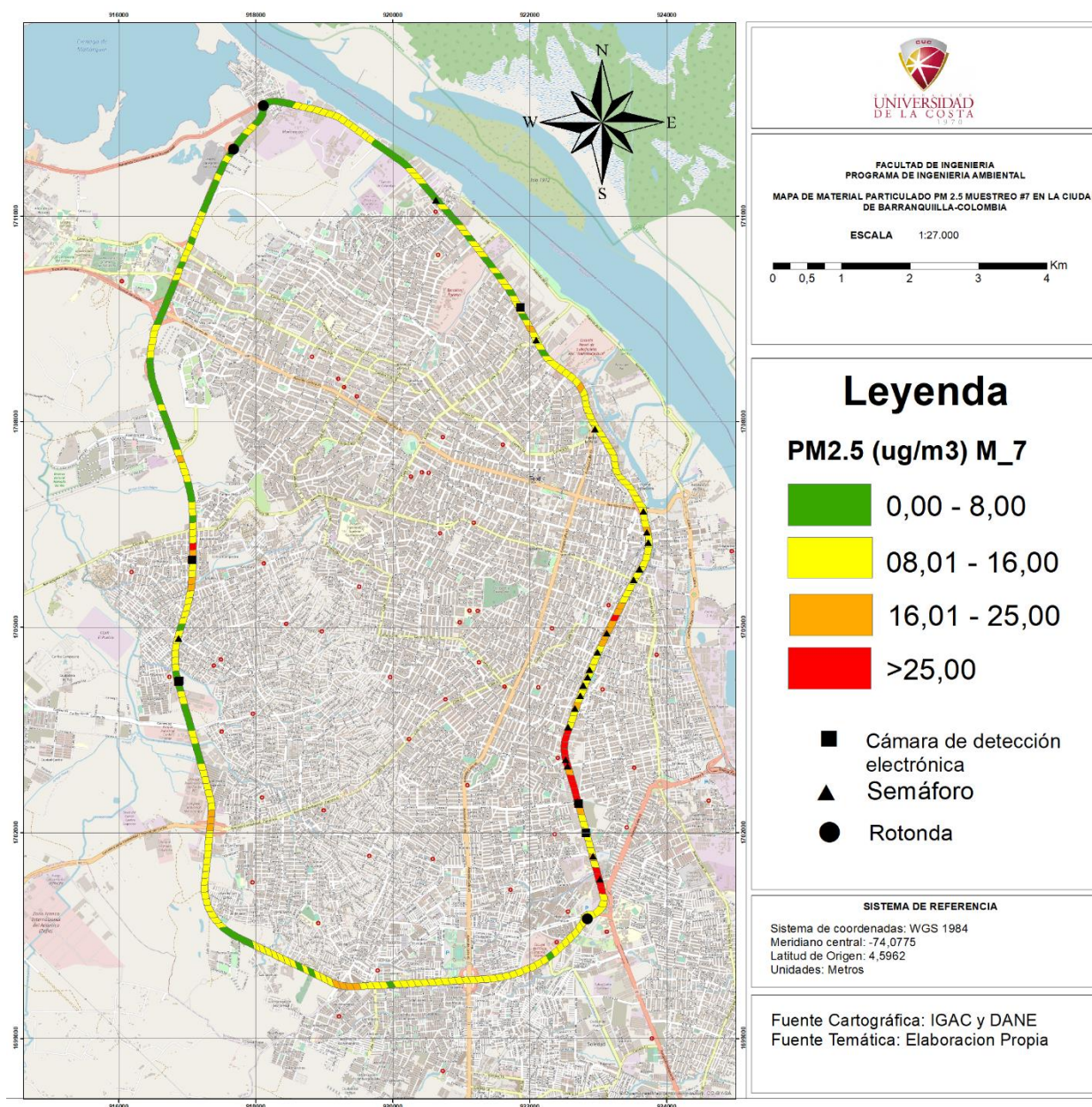


Anexo 13: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 7.



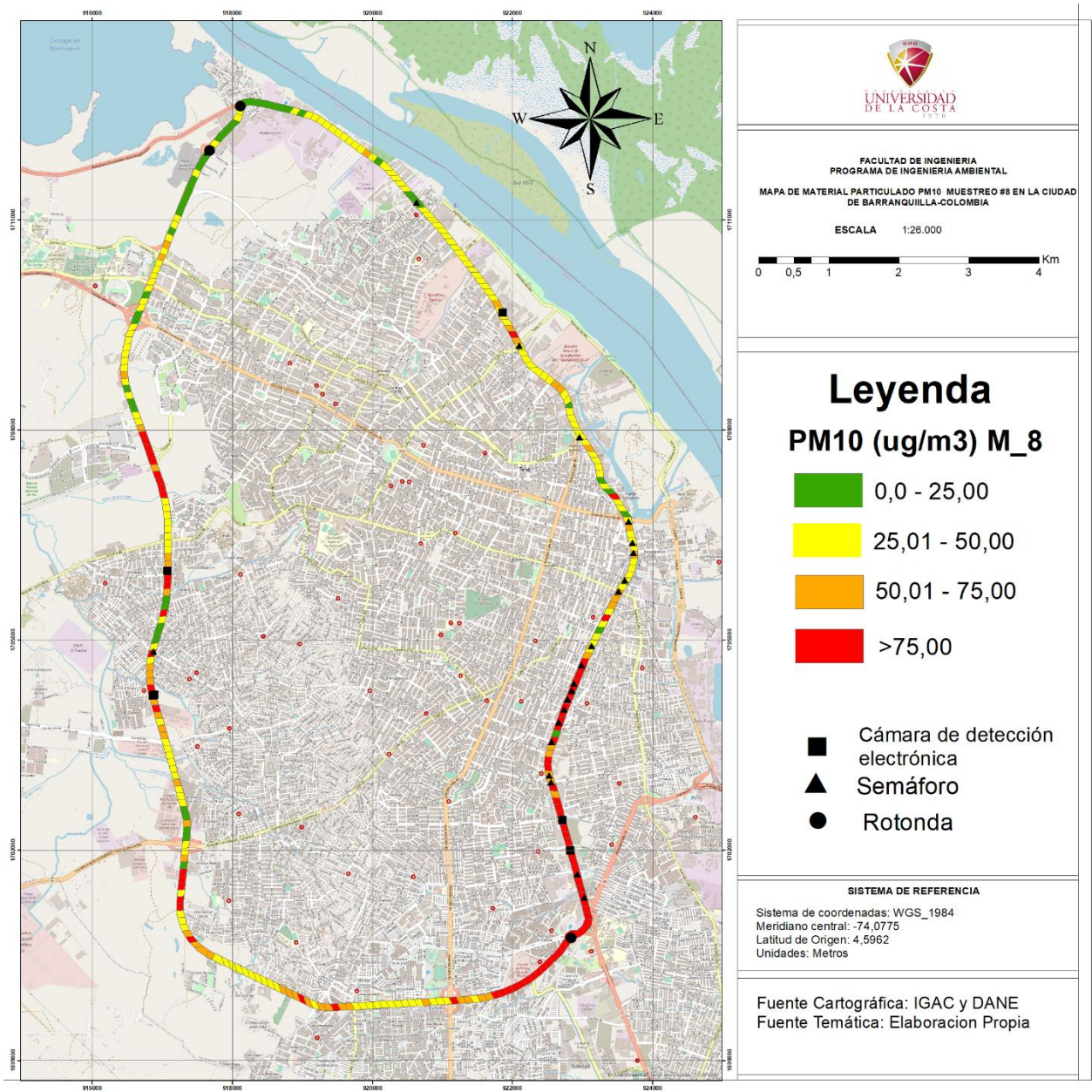


*Anexo 14: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM<sub>2.5</sub> para el muestreo 7.*



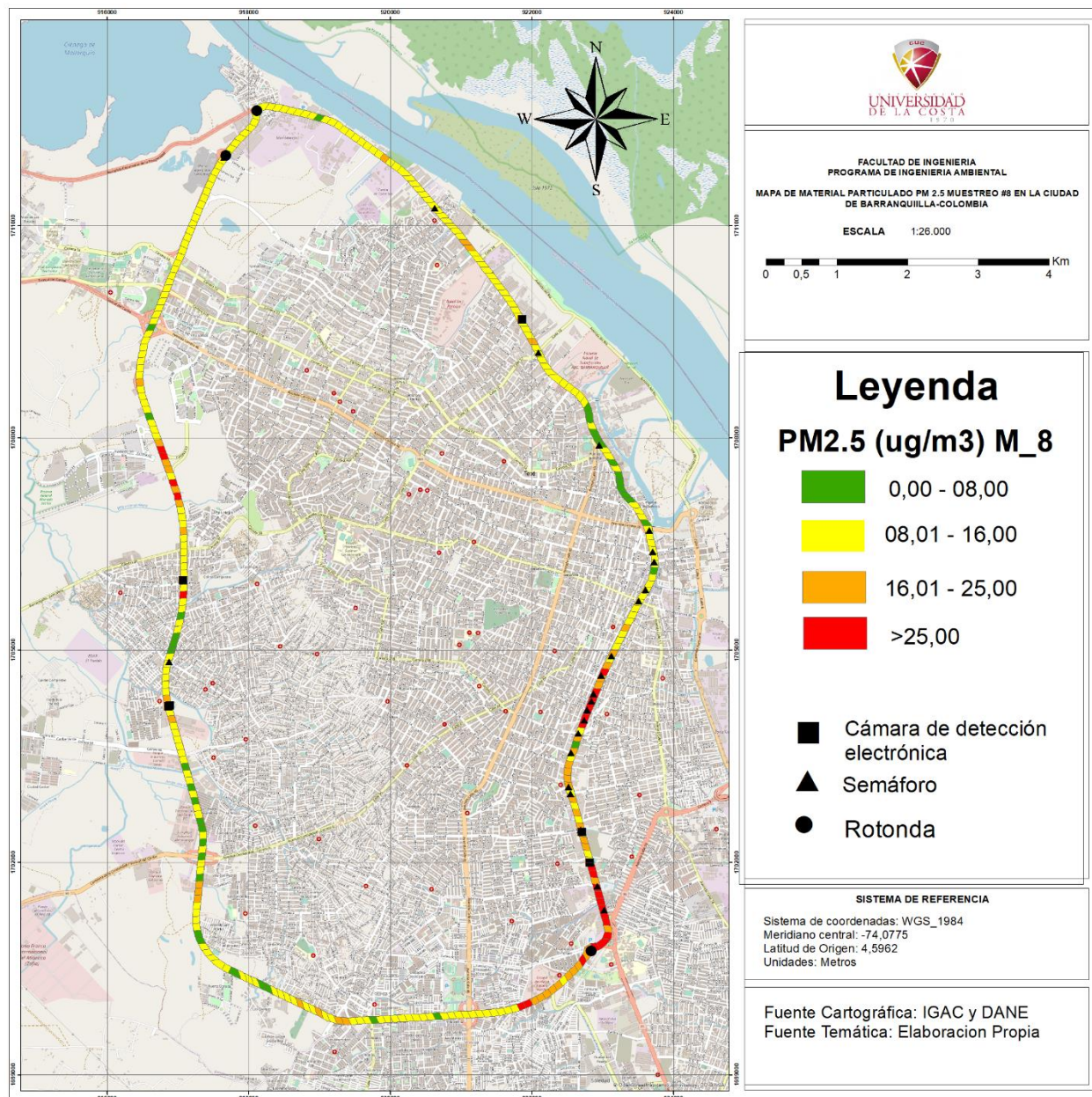


Anexo 15: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 8.



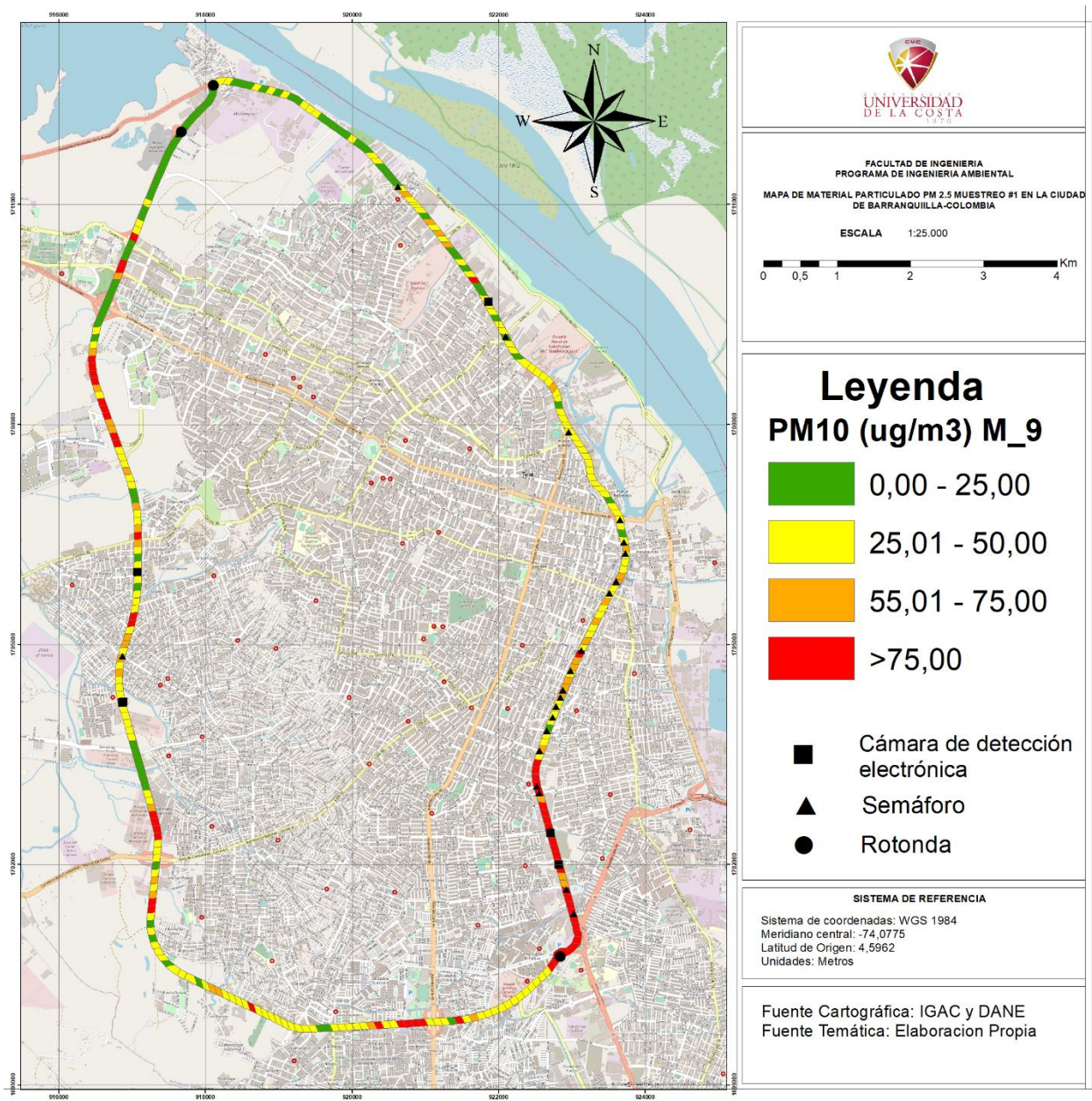


*Anexo 16: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM<sub>2.5</sub> para el muestreo 8.*

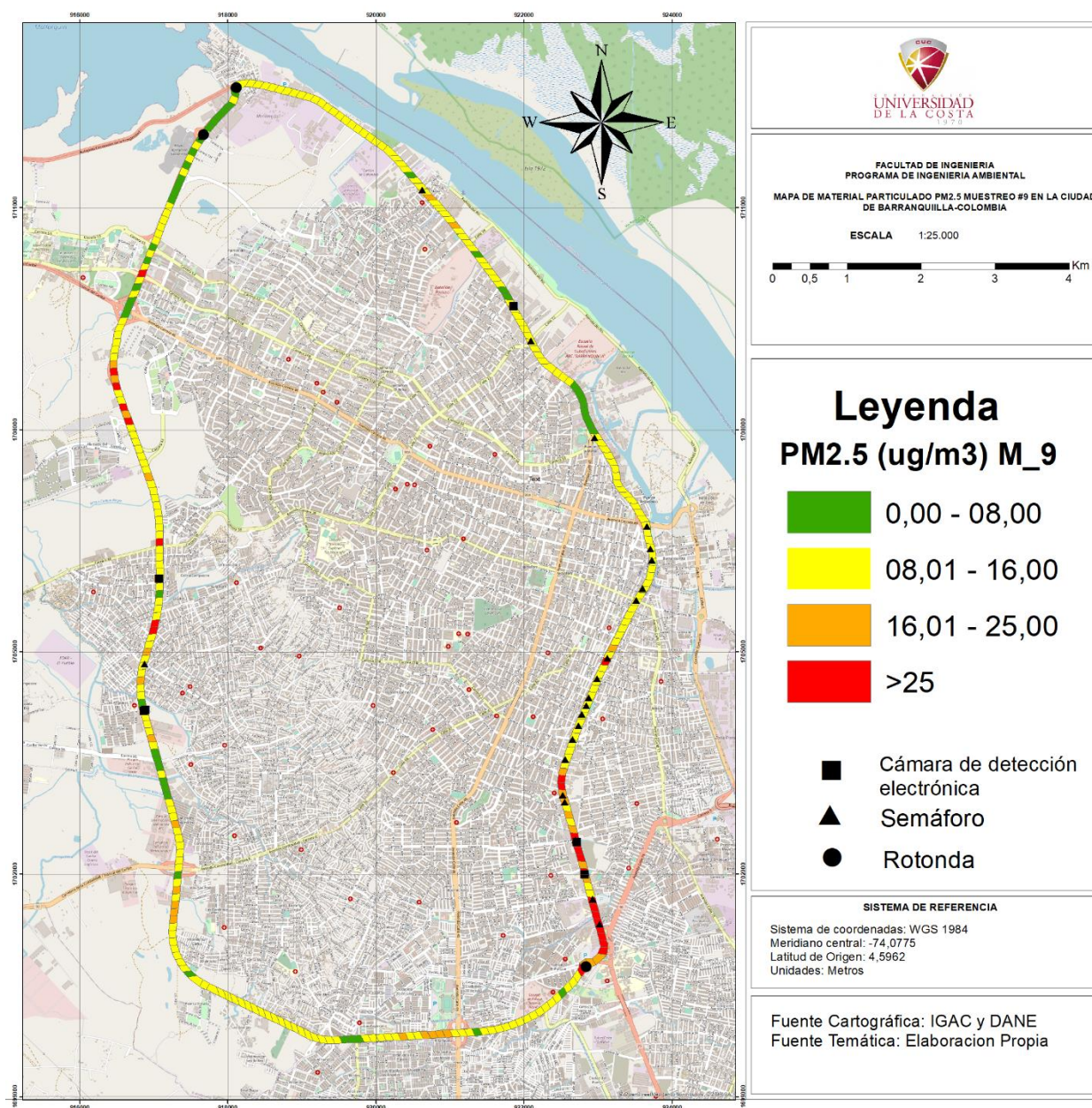




Anexo 17: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM10 para el muestreo 9.





*Anexo 18: Distribución espacial de las concentraciones promedio de PM2.5 para el muestreo 9.*

*Anexo 19: Prueba de tiempos de monitoreo 5s, 10s, 15s, 20s, 25s, 30s.*

Prueba 5 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	4,5549	17,8240
Desviación	0,3019	3,9814
error	0,0040	0,0524
Prueba 10 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	4,2650	15,5658
Desviación	0,1597	3,0404
error	0,0032	0,0608
Prueba 15 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	3,8703	13,1259
Desviación	0,5452	8,5086
error	0,0160	0,2503
Prueba 20 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	3,7815	9,9395
Desviación	0,1003	0,8057
error	0,0037	0,0298
Prueba 25 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	3,8400	11,2116

Desviación	0,4665	1,3181
error	0,0212	0,0599
Prueba 30 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	4,0391	12,5506
Desviación	0,0896	2,0542
error	0,0050	0,1141

---

*Anexo 20: Prueba de tiempo de monitoreo para 10 segundos.*

Prueba 1 - 10 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	6,75	24,23
Desviación	0,38	3,02
error	0,01	0,06
Prueba 2 - 10 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	6,66	24,31
Desviación	0,34	2,59
Error	0,01	0,05
Prueba 3 - 10 Seg	PM2.5	PM10
Promedio	6,52	25,10
Desviación	0,25	3,63
error	0,00	0,06



*Anexo 21: Prueba de tiempo de monitoreo para 20 segundos.*

Prueba 1 - 20		
	PM2.5	PM10
Seg		
Promedio	7,00	25,91
Desviación	0,23	2,61
error	0,01	0,10
Prueba 2 - 20		
	PM2.5	PM10
Seg		
Promedio	6,54	22,93
Desviación	0,33	2,61
error	0,01	0,09
Prueba 3 - 20		
	PM2.5	PM10
Seg		
Promedio	6,00	24,33
Desviación	0,37	3,47
error	0,01	0,13

*Anexo 22: evidencia de obra civil realizada en la calle 30.*

*Fuente: Autores.*



**Anexo 23:** Evidencia de congestión vehicular, se usó un carril en ambos sentidos calle 30.

**Fuente:** Autores





*Anexo 24: Congestión vehicular producto de obra de civil en la calle 30.*

*Fuente: Autores.*



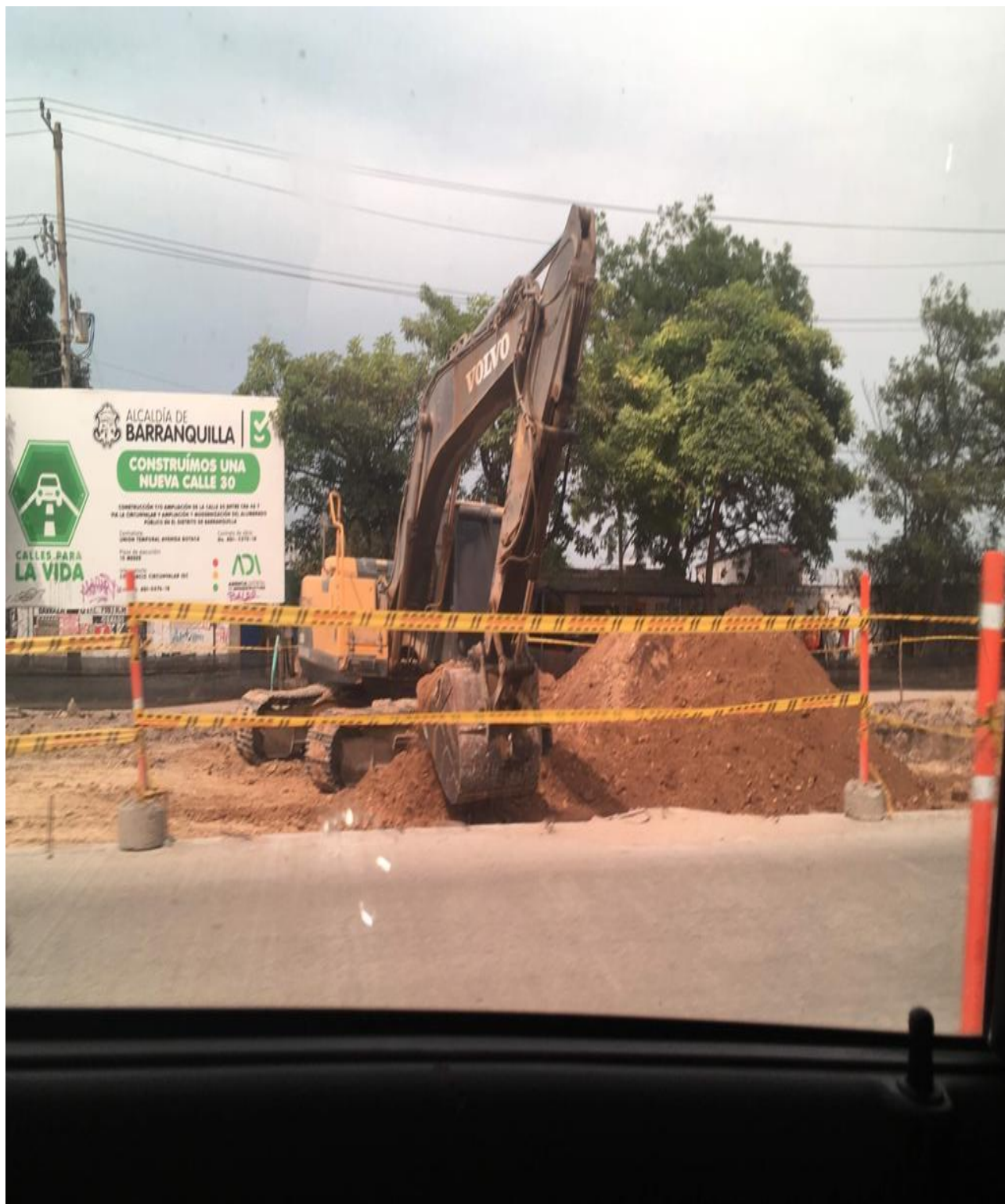
*Anexo 25: Obra civil adelantada en la calle 30.*

*Fuente: Autores.*



*Anexo 26: Uso de maquinaria pesada en la calle 30.*

*Fuente: Autores.*





*Anexo 27: Uso de maquinaria pesada en la construcción de la Cra 43 en la Avenida Circunvalar.*

*Fuente: Autores.*



*Anexo 28: Obra civil de la Cra43 en la Avenida Circunvalar.*

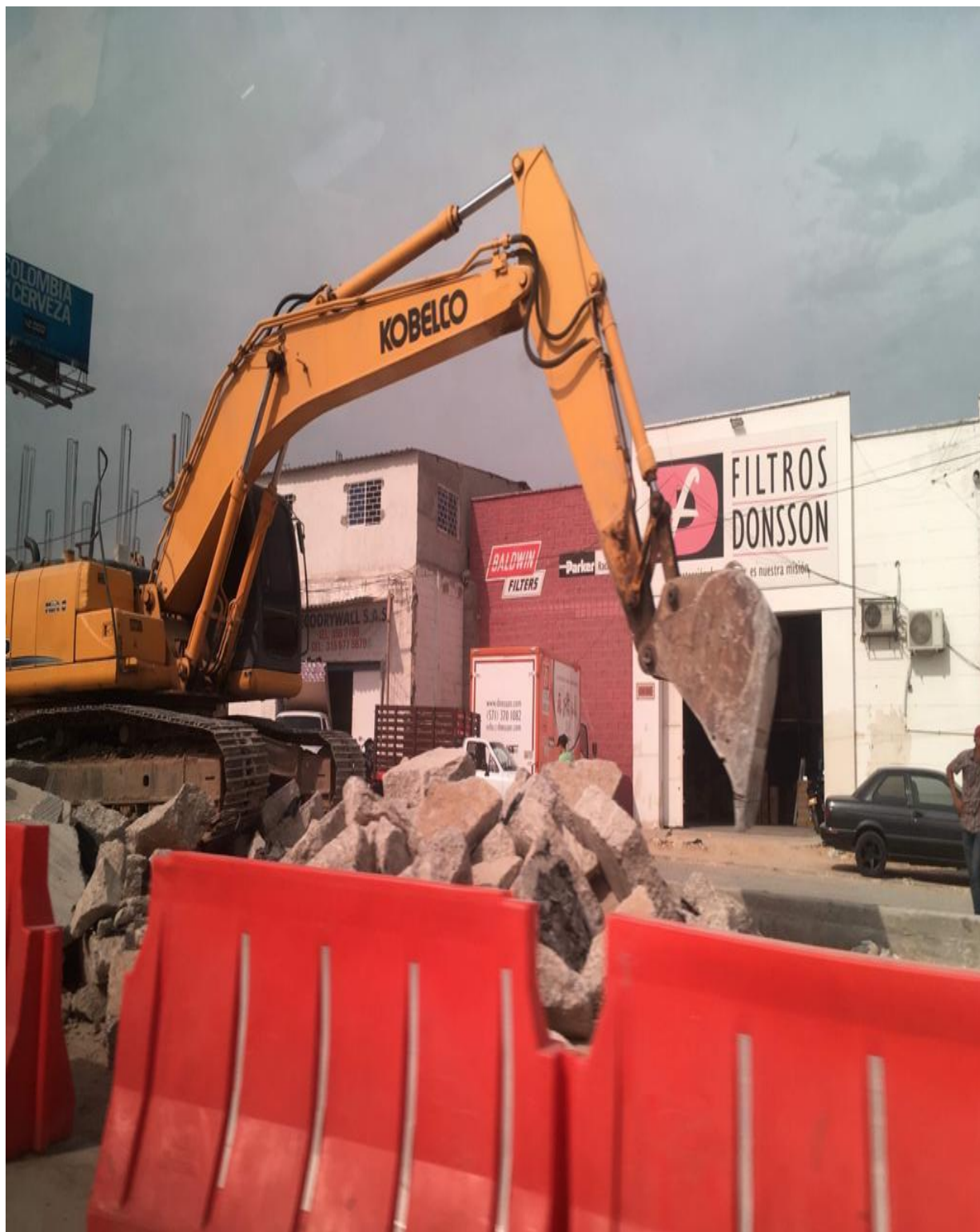
*Fuente: Autores.*





*Anexo 29: Obras realizadas en la Avenida circunvalar.*

*Fuente: Autores.*



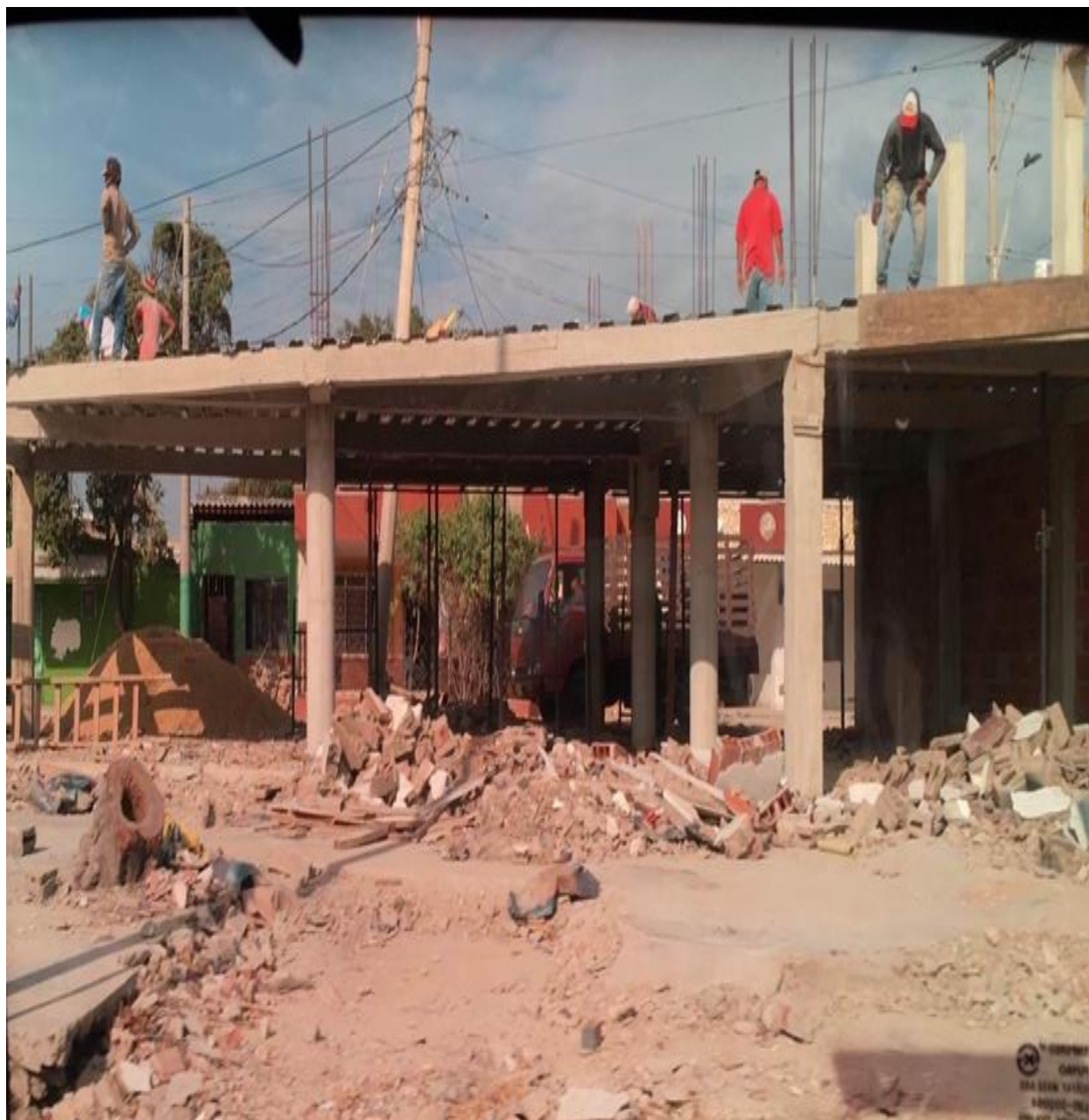
*Anexo 30: Obras realizadas en la Avenida circunvalar.*

*Fuente: Autore*



*Anexo 31: Obras civiles aledañas a la Avenida Circunvalar.*

*Fuente: Autores.*





*Anexo 32: Vehículos pesados usados en las obras de la Avenida Circunvalar.*

*Fuente: Autores.*



*Anexo 33: Vía en mal estado tramo Avenida Cirvalar*

*Fuente: Autores.*

